



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

MORFODINÀMICA D'UNA LLERA AUXILIAR A UN RIU DE GRAVES. EL CAS DEL GÁLLEGO.

Treball realitzat per:

Júlia Boix Oliva

Dirigit per:

Carles Ferrer Boix

Juan Pedro Martín Vide

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 13 de juny de 2019

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRAÏMENTS

Primer de tot vull agrair al Juan Pedro Martí Vide la oportunitat d'introduir-me al món de la recerca a través d'una beca de col·laboració; ja que si no, difícilment hagués realitzat aquest treball.

També vull agrair a ell i al Carles Ferrer Boix la seva gran dedicació a través de consells i coneixements en la matèria durant la realització del treball. M'agradaria fer menció especial del Carles Ferrer Boix pel gran suport que m'ha donat en la programació del model mitjançant indicacions.

RESUM

El treball consisteix en la realització d'un model d'una dimensió amb seccions transversals compostes, és a dir que poden incloure una llera principal i planes d'inundació, on es simulen els processos hidràulics, de transport de fons i les actualitzacions de la cota del fons de la llera principal degudes a diferències en el transport de fons.

Els càlculs hidràulics estan realitzats suposant flux gradualment variat. El model numèric també és capaç de simular el règim uniforme.

El transport de fons s'ha calculat a partir de l'equació de Meyer-Peter i Müller per cada classe granulomètrica del material, és a dir, que el càlcul permet la definició del sediment mitjançant la granulometria i per tant no té perquè ser material uniforme. A partir dels resultats del transport de fons s'actualitzen les cotes del fons de la llera principal mitjançant l'equació de conservació de la massa. Les noves cotes del fons s'utilitzaran per realitzar els càlculs hidràulics en el següent instant de temps.

A partir dels resultat obtinguts imposant diferents condicions de contorn s'ha analitzat quin és l'efecte de les planes d'inundació i de la dispersió granulomètrica als perfils longitudinals d'equilibri. En el cas de les planes d'inundació s'ha observat que l'ajust a les noves condicions d'equilibri no es fa seguint una única fase d'erosió o acreció, a diferència dels casos amb llera rectangular. Pel que fa a la dispersió granulomètrica (σ), s'ha observat que amb valors de $\sigma=1,74$ s'obtenen resultats força diferents als obtinguts amb una dispersió geomètrica unitària (material uniforme), com per exemple increments del calat de quasi el 50% en el cas de llera composta.

Un cop estudiat el comportament del model numèric s'ha simulat una situació real i s'ha contrastat el seu comportament amb el que es va produir realment, sense oblidar les simplificacions realitzades tant en el model numèric com en les condicions de contorn i les seves implicacions en els resultats.

El model és capaç de simular satisfactòriament el règim gradualment variat i el tractament de la granulometria del transport de fons.

ABSTRACT

This thesis consists on the development of a one-dimension model with compound transversal sections, which can include a main channel and floodplains, where it simulates the hydraulic and bed load sediment processes and the update of the main channel's bottom due to transport rates.

The hydraulic calculations were performed assuming gradually varied flow, and the numerical model is able to simulate the uniform regime too.

The bed load sediment is calculated using the Meyer-Peter and Müller equation for each sediment grain size, meaning that a non-uniform material can be set with its grain size distribution. Considering the bed load sediment results, the main channel's bottom height is updated according to mass conservation equation. The new heights' values will be used for the hydraulic calculation at the next time step.

The effect of the floodplains and the grain size distributions of the bed load sediment at the longitudinal equilibrium profile is analysed for different boundary conditions. Due to the existence of the floodplains the new equilibrium is not reached through a unique erosion or accretion process, unlike the non-floodplain calculations. Regarding the geometric standard deviation (σ) of the grain size distribution, it is observed that when considering a value of $\sigma=1.74$ the results obtained are quite different from the ones obtained with a unitary geometric standard deviation, for example the increase of the water depth is almost 50% higher with a compound channel.

Once the behaviour of the numerical model is analysed, a real simulation is computed in order to compare it with real data, without forgetting the simplifications made at the model and at the boundary conditions and its implications towards the results.

The model is able to simulate the gradually varied flow and the grain size distribution of the bed load sediment satisfactorily.

Índex

1. Introducció i Objectius.....	6
2. Estat actual del coneixement	9
3. Cas d'estudi.....	11
3.1. Història i motivació	11
3.2. Dades disponibles	16
3.2.1. Topografia	16
3.2.2. Mesures de camp: cabals – líquid i sòlid-, camp de velocitats i granulometria) .	18
3.2.3. Dades procedents de models hidràulics anteriors	21
4. Model numèric.....	22
4.1. Equacions.....	23
4.1.1. Flux Gradualment Variat.....	23
4.1.2. Conservació de la massa (Exner)	30
4.1.3. Equilibri del fons (Balança de Lane).....	36
4.2. Hipòtesis i simplificacions.....	37
4.2.1. Geometria.....	39
4.2.2. Condicions inicials.....	39
4.2.3. Condicions de contorn.....	39
4.3. Comprovacions.....	40
4.3.1. Llera rectangular.....	40
4.3.2. Llera composta	41
4.3.3. Sensibilitat a la dispersió granulomètrica	42
4.4. Cas d'estudi.....	45
4.4.1. Geometria.....	45
4.4.2. Condicions inicials	47
4.4.3. Condicions de contorn.....	48
5. Resultats	52
5.1. Llera rectangular.....	52
5.1.1. Cas 1.0	52
5.1.2. Cas 1.1	53
5.1.3. Cas 1.2	55
5.1.4. Cas 1.3	56
5.1.5. Cas 1.4	58
5.2. Llera composta	60
5.2.1. Cas 2.0	60
5.2.2. Cas 2.1	61
5.2.3. Cas 2.2	64
5.2.4. Cas 2.3	65

5.2.5.	Cas 2.4	67
5.3.	Sensibilitat a la dispersió granulomètrica	69
5.3.1.	Situació inicial	69
5.3.2.	Situació d'equilibri	74
5.4.	Cas d'estudi	86
5.4.1.	Anàlisi de les condicions de contorn	86
5.4.2.	Resultats	94
5.4.3.	Resum dels resultats	98
6.	Conclusions i Recomanacions	100
7.	Referències	103
	Annexos	105
	Annex A. Model base	106
	Annex B. Dades d'entrada de la granulometria del transport de fons	107
	Annex C. Divisió de cabals	113
	Annex D. Relació nodal	115

1. Introducció i Objectius

Els rius són elements vius que estan constantment canviant de forma en planta, secció i perfil a causa de les pertorbacions del seu equilibri. L'estudi de l'evolució temporal d'aquests canvis de les formes del riu (Martín Vide, 2013) s'anomena morfodinàmica, tot i que el seu ús encara no s'ha consolidat. El terme morfodinàmica prové del terme en grec “morphé” que significa forma i “dinàmica” que s'utilitza amb el significat habitual de la paraula (que originalment també prové del grec) (Grup Enciclopèdia Catalana, 2019).

Les pertorbacions poden ser degudes a situacions naturals, com la variació del cabal líquid per motius meteorològics, o motivades per l'ésser humà, com podria ser l'extracció de graves de la seva llera. Aquests dos podrien ser uns exemples força habituals, però n'hi ha molts d'altres; a més a més els canvis no tenen perquè estar motivats per una sola causa, sinó que poden ser deguts a la combinació de més d'una. En tots els casos, el riu intentarà buscar un nou equilibri amb les noves condicions.

A vegades s'oblida la dinàmica dels rius i es consideren un element immòbil construint-hi a la vora sense considerar les possibles variacions del seu curs o urbanitzant les seves planes d'inundació, potser sense ser-ne conscient, ja que el riu les ocupa amb poca freqüència. És en casos com aquests, un cop ja s'ha urbanitzat l'espai del riu, que s'intenta frenar la seva dinàmica i evolució cap a l'equilibri.

Una de les actuacions més habituals és canalitzar el riu (Martín Vide, 2015) i impedir la variació del curs; una altra, en el cas de rius meandriformes, és la creació d'una llera artificial (lebenministerium, 2011) que talla el meandre amb l'esperança que el riu esculli el recorregut més curt i abandoni així el meandre i no el faci més profund en planta. Entenem que un meandre es fa més profund en planta quan progressa en la direcció perpendicular a l'eix del riu erosionant-ne el marge exterior (Martín Vide, 2002).

Aquesta última actuació es basa en el propi comportament dels rius meandriformes. Aquests tenen la tendència natural d'anar fent més profunds en planta els meandres, mentre al mateix temps van migrant aigües avall; això acaba produint que s'uneixin dos trams del riu i l'abandonament del meandre. A la Figura 1-1 es pot veure com el meandre es fa més profund en planta i acaba sent abandonat de manera natural. Per tant la creació d'una llera artificial que retalli el meandre intenta assimilar-se a aquest comportament dels rius meandriformes, però accelerant-ne el procés.



Figura 1-1: Fotografies aèries del tram superior del riu Gállego, meandre al Peñaflores.
Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017).

En el mateix riu Gállego de la Figura 1-1, però més aigües avall al seu pas per Zaragoza, a l'estiu del 2015 es construí una llera artificial. Aquesta es sedimentà durant dues crescudes ordinàries, una al febrer del 2016 i l'altra al novembre del mateix any (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017).

L'objectiu principal d'aquest treball és simular la sedimentació que es produí a la llera artificial del riu Gállego, canal auxiliar a partir d'ara, mitjançant la realització d'un programa amb MATLAB en una dimensió (1D). S'ha considerat adequada la simplificació a una dimensió ja que el tram d'estudi té poca curvatura.

Per tal d'assolir l'objectiu principal s'han marcat dos objectius intermedis:

El primer és la realització d'un model en 1D amb les següents característiques:

- Secció composta (que permeti la definició d'una llera principal i d'unes planes d'inundació)
- Càlcul de la hidràulica en règim gradualment variat
- Consideració del transport sòlid i de l'actualització del fons de la llera
- Acoblament del càlcul hidràulic i morfodinàmic
- Material de la llera i del transport de fons de moltes mides, és a dir, que siguin mescles, material no uniforme
- Fenomen d'exposició i ocultament del material de la llera

El segon objectiu és determinar la sensibilitat dels resultats a la dispersió granulomètrica entenent tots els processos que hi ha al darrere del transport de sediment de fons en el cas de mescles, així com l'efecte de les planes.

És per això que s'ha desestimat l'aplicació d'un model existent com es descriu amb més detall a l'apartat 2.

L'apartat 3 es divideix en dos subapartats: el primer descriu la motivació per realitzar aquest treball i la història del cas d'estudi; i el segon, les dades de què es disposen per realitzar-ne la simulació.

A l'apartat 4 es detallaran les equacions que s'han resolt i les hipòtesis que s'han considerat per a realitzar el càlcul.

L'apartat 5 inclou tots els resultats obtinguts al treball, tant de l'anàlisi i comprovació del model com del cas d'estudi.

El treball també ha de servir per ajudar al gestor (Ajuntament) en la presa de decisions per a lluitar contra les inundacions i les erosions de vora del riu Gállego al seu pas per Zaragoza; ja que aquest treball aprofundeix més en la recerca i l'anàlisi fet en el document (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017), que va servir d'assessorament a l'Ajuntament.

2. Estat actual del coneixement

El model que es presenta en aquest treball és un model que realitza el càlcul del flux en règim gradualment variat (concepte definit al següent paràgraf) i que té en compte les mescles en el càlcul del transport de fons i per tant en l'actualització de les cotes del fons de la llera principal. Aquestes cotes s'utilitzaran pel càlcul de la hidràulica en el següent pas de temps. És a dir que existeix un acoblament de la hidràulica amb el transport de fons.

El règim gradualment variat (GVF, per les sigles en anglès) és aquell en el qual el flux no és uniforme i els canvis que es produeixen en el calat i en totes les variables del flux són graduals. Per altra banda el règim uniforme és aquell en què el flux té unes característiques idèntiques en tota la longitud del tram d'estudi i el calat que el defineix és el calat normal (veure l'apartat 4.1.1 per més informació). En base a les definicions anteriors, el règim gradualment variat és més acurat ja que permet variacions de les variables del flux al llarg del tram d'estudi.

S'entén per mescles el material definit amb una corba granulomètrica i no amb un únic diàmetre característic, és a dir que el model calcula quina és la tensió de fons pels diferents diàmetres en què es divideix la corba granulomètrica. A més a més en el càlcul de la tensió crítica es considera el fenomen d'exposició i ocultament (veure l'apartat 4.1.2 per a més detall).

Pel que fa a la geometria del model no només accepta una geometria rectangular sinó que permet introduir unes planes d'inundació. Això sí, aquestes no participen en el transport de fons, és a dir que només es permet l'acumulació o l'erosió de material a la llera principal.

A continuació es fa un breu resum de la informació trobada de models similars al que es realitza en aquest treball.

Hi ha força articles que parlen de models morfodinàmics amb règim uniforme o gradualment variat i que introdueixen l'efecte de les mescles.

Per exemple, els articles següents consideren el cas de règim gradualment variat o uniforme amb mescles: (Cui & Parker, 2005), (Cui, et al., 2006) i (Cui, et al., 2003).

N'hi ha d'altres que només simulen el règim gradualment variat amb mescles: (Hoey & Ferguson, 1994) i (Viparelli, et al., 2010).

I els articles (Ferrer Boix & Hassan, 2013) i (Ferrer Boix, et al., 2014) consideren únicament el règim uniforme amb mescles.

Tots els models presentats anteriorment només consideren el cas de llera rectangular. Per tant, no tenen en compte l'efecte de les planes que sí que es considera en aquest treball.

Els models anteriors (del (Cui & Parker, 2005) al (Ferrer Boix, et al., 2014)) són models 1D, com el d'aquest treball. L'ús de models en 2D o 3D s'ha desestimat,

ja que un dels objectius és entendre millor els processos de canvi de la cota del fons. Al tractar-se d'un procés complex s'ha simplificat a una única dimensió. Amb un model 2D o 3D hi ha moltes més variables que s'han de considerar i la realització complerta d'un model de més d'una dimensió està fora de l'abast d'un treball d'aquestes característiques.

En l'actualitat hi ha models en 1D o 2D que intenten explicar aquests processos, com l'HEC-RAS (US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2016) o l'Iber (CEDEX, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Flumen, CIMNE, 2014).

L'HEC-RAS és un model que permet simular en 1D o 2D lleres en làmina lliure. Incorpora el transport de fons i la variació del fons considerant material no uniforme. S'ha descartat perquè al tractar-se d'un model robust i estable per moltes situacions s'han hagut de fer moltes simplificacions. Això és demostra amb els problemes que s'han trobat en aquest treball al realitzar el càlcul de la hidràulica i que l'HEC-RAS calcula sense problemes; ja que el fet que l'aigua passi d'ocupar les planes d'inundació a només la llera principal, o a l'invers, és una situació crítica.

L'Iber és un model en 2D que permet la simulació de lleres en làmina lliure i incorpora el transport de sediment i la variació del fons, però amb material uniforme. Per tant s'ha descartat perquè no permet la incorporació de mesclades en el càlcul.

Per altra banda, l'objectiu d'aquest treball és entendre els processos que van dur al colgament una llera de 400 m de llarg i les dades de geometria de què es disposa no són suficientment precises com per realitzar un model 2D, perquè les simplificacions que s'haurien de realitzar no compensen l'ús de models més sofisticats.

3. Cas d'estudi

Com ja s'ha mencionat a la introducció, un dels objectius d'aquest treball és la simulació del canal auxiliar construït al riu Gállego al seu pas per Zaragoza, a prop de la seva desembocadura al riu Ebre.

A continuació s'explica una mica la història del riu així com la motivació per realitzar aquest treball i les dades que es disposen.

3.1.Història i motivació

El riu Gállego és un riu de graves que neix a les proximitats del Coll d'Àneu (2200m) i desemboca al riu Ebre a l'altura de Zaragoza. La seva conca té aproximadament uns 4000 km² i està regulat per 3 embassaments. Ordenats d'aigües amunt a aigües avall són els següents: el de Búbal construït el 1971 i amb una capacitat de 64 hm³, el de La Peña del 1913 i amb una capacitat de 25 hm³ i per últim el d'Ardisa construït el 1932 amb una capacitat de 5,3hm³.

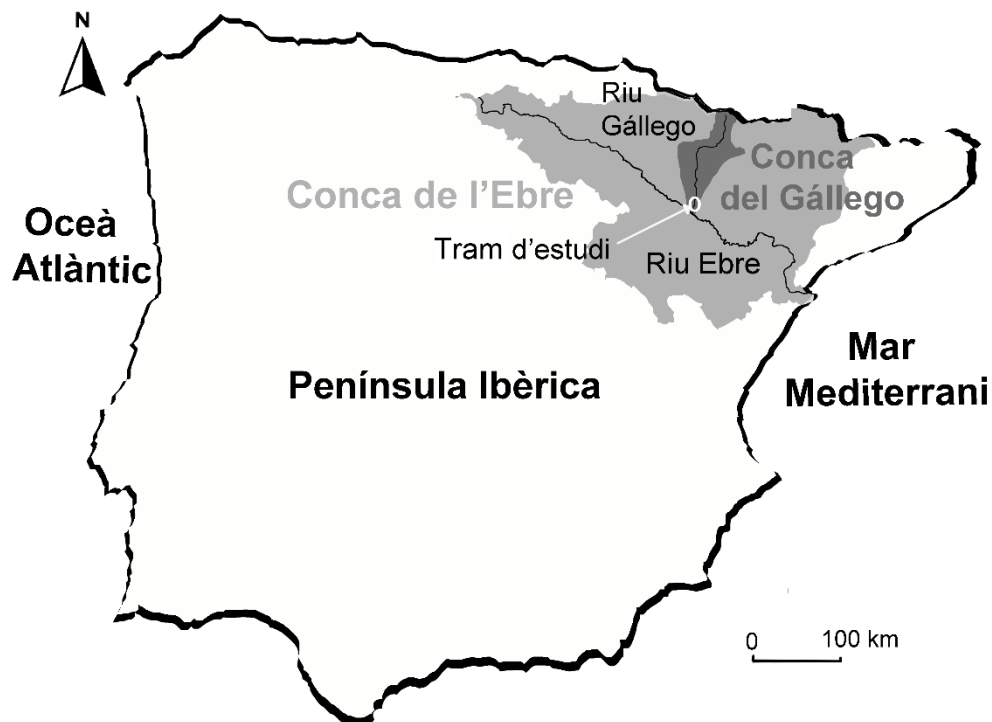


Figura 3-1: Plànol de situació del tram d'estudi, conjuntament amb la conca del riu Ebre i del riu Gállego. Font: elaboració pròpia.

A la Figura 3-1 es pot veure la situació del riu Gállego i la seva conca respecte la conca de l'Ebre i tota la Península Ibèrica. Amb un cercle blanc es marca el tram d'estudi. A la Figura 3-2 es pot veure l'evolució temporal en planta del riu en aquest tram d'estudi. A les imatges més antigues (1927-1984) el riu és

trenat i va canviant la seva morfologia dins d'un espai al·luvial molt ample el qual es va reduint gradualment amb els anys. En els anys posteriors s'ha reduït molt més l'amplada al·luvial i s'ha canalitzat el tram aigües amunt del tram d'estudi. Això ha acabat afectant conjuntament amb altres factors i convertint el tram d'estudi en un riu meandriforme.

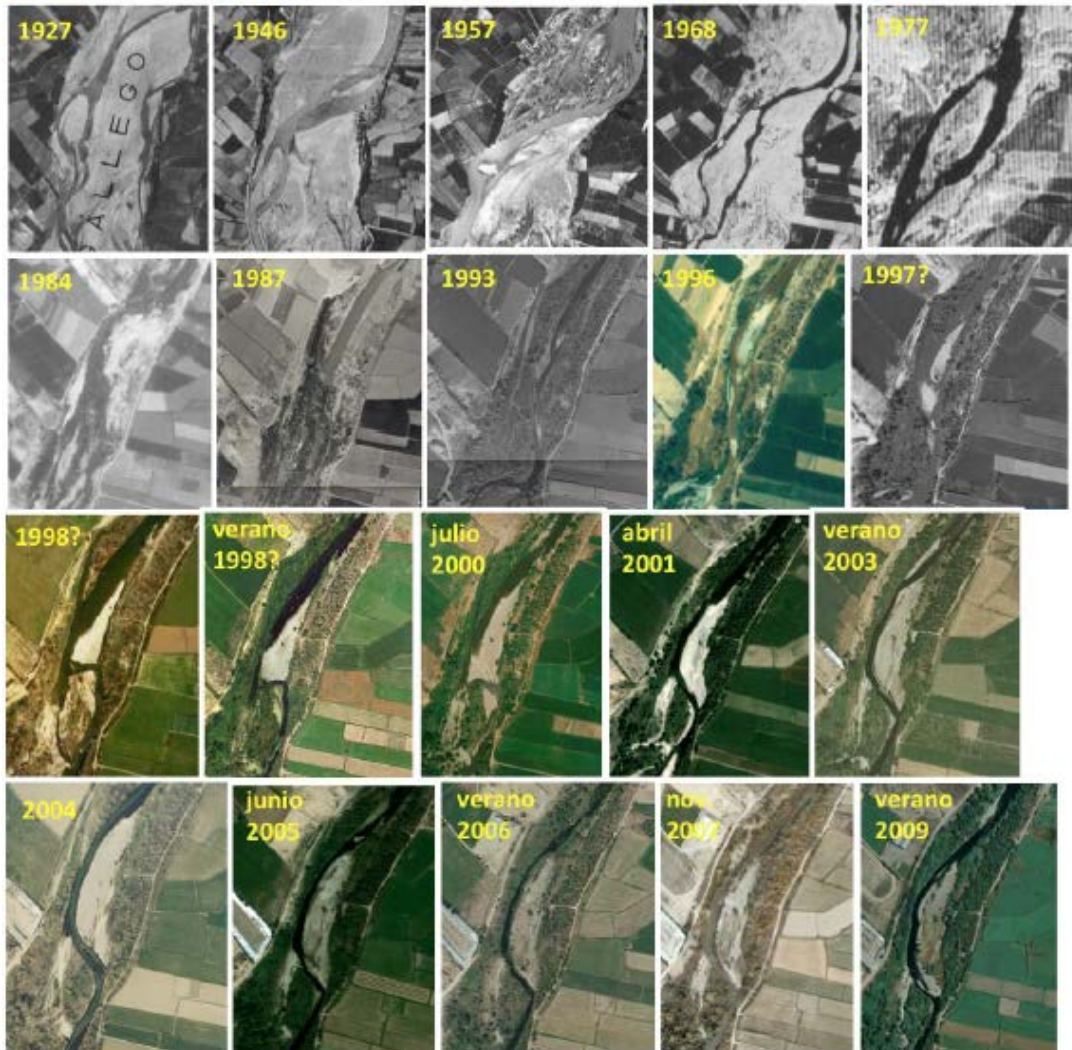


Figura 3-2: Fotografies aèries històriques del tram d'estudi. Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017) gentilesa de A. Ollero.

El curs del riu és més estable quan és meandriforme, en el sentit que hi ha poca mobilitat de les graves situades a les planes d'inundació. Això hi permet el creixement de vegetació, tal com es pot veure comparant les imatges més antigues, on les planes d'inundació estan lliures de vegetació (es veu la grava, de color gris clar), amb les més actuals, on les planes d'inundació estan cobertes de vegetació.

Per entendre els canvis en la morfologia del riu s'ha de conèixer la seva història i les alteracions humanes que s'han realitzat. Resumint a grans trets, els canvis són produïts per l'extracció de graves del riu durant els anys 1960 y 1980, l'abocament de deixalles i la canalització que s'observa a l'any 1987. La seva evolució s'estudia més detalladament a les referències (Universitat Politècnica

de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017) i (Martín Vide, et al., 2010).

Centrant-nos en la història més actual, podem definir el riu en el tram d'estudi com un riu sinuós on la posició dels meandres és mòbil, ja que no estan fixats de cap manera.

Sense tenir en compte aquesta característica dels rius naturals (la seva mobilitat), es van construir un passeig, un carril bici i un col·lector al marge dret del riu. Aquest va anar canviant el seu curs, fent més profund en planta el meandre existent i erosionant la vora del marge dret i enduent-se el carril bici (Figura 3-3). A causa d'això es va realitzar una protecció de 200 metres amb gabions (Figura 3-5) a la vora afectada del riu i la excavació d'un canal auxiliar de 10 metres de base, 1,5 metres de profunditat i 400 metres de longitud a la pròpia grava del riu (Figura 3-4).

Aquest canal auxiliar retalla el meandre fent el recorregut més curt amb l'objectiu d'alliberar cabal del riu en situacions de cabals elevats i reduir els canvis del meandre (es pot veure una planta a la Figura 3-7). La cota del fons del canal auxiliar a l'extrem superior està mig metre per sobre del llit del riu.

Després d'una crescuda ordinària al febrer del 2016 ($190 \text{ m}^3/\text{s}$) el canal auxiliar es va omplir parcialment de sediment. Al novembre del 2016 amb una avinguda de $354 \text{ m}^3/\text{s}$ de cabal màxim es va omplir completament el canal auxiliar quedant inutilitzat com es pot veure a la vista aèria de la Figura 3-8.

A més els gabions que es van col·locar per protegir el marge del riu es van trencar a causa de la força de l'aigua com es pot veure a la Figura 3-6.



Figura 3-3: Vista des d'aigües amunt del passeig destruït (2014). Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017). Autor: José Bellosta.



Figura 3-4: Vista des d'aigües amunt del canal auxiliar (2015). Font: (Hermanos Caudevilla, S.L., 2015)



Figura 3-5: Construcció dels gabions (setembre 2015). Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017). Autor: José Bellosta



Figura 3-6: Vista del passeig (gener 2017). Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017). Autor: UPC.



Figura 3-7: Planta del canal auxiliar i la línia de protecció de la vora amb els gabions. Font: (Hermanos Caudevilla, S.L., 2015)



Figura 3-8: Vista aèria del riu Gállego a l'esquerra i el canal auxiliar colgat de sediment a la dreta (juliol 2017). Font: Ajuntament de Zaragoza.

Aquest treball ha estat motivat per l'interès a intentar explicar, analitzar i trobar quines han estat les condicions que han portat a la quasi completa sedimentació

o colgament del canal auxiliar. Per poder-ho realitzar s'ha optat per elaborar un model 1D amb Matlab per tal de tenir un control complet sobre totes les variables que intervenen.

Aquest model, que s'explicarà amb més detall a l'apartat 4, permet analitzar com s'erosiona o s'acumula el sediment a la llera principal del canal auxiliar en funció de les condicions de contorn (cabal líquid d'entrada, cabal sòlid i nivell d'aigua aigües avall) i de la morfologia de la llera (geometria, pendent i granulometria). És a dir que el model es pot aplicar en altres rius i en casos més generals. Tenint sempre en compte les limitacions que s'expliquen a l'apartat 4.2.

Abans de simular la situació d'estudi s'ha realitzat un anàlisi del funcionament del model tant en llera rectangular com amb llera composta per tal d'entendre els efectes de les planes d'inundació o de la dispersió de la granulometria, mantenint el mateix D_{50} (diàmetre de garbell que passa el 50% del material).

Al document (UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005) s'analitza l'ompliment del canal auxiliar en el període del 2015 al 2017 i s'obté que l'ompliment ha estat d'uns 5400 m³, aquest valor representa al voltant d'un 62% del volum excavat i una mitjana d'acumulació de 0,90 m al llarg de tot el canal auxiliar.

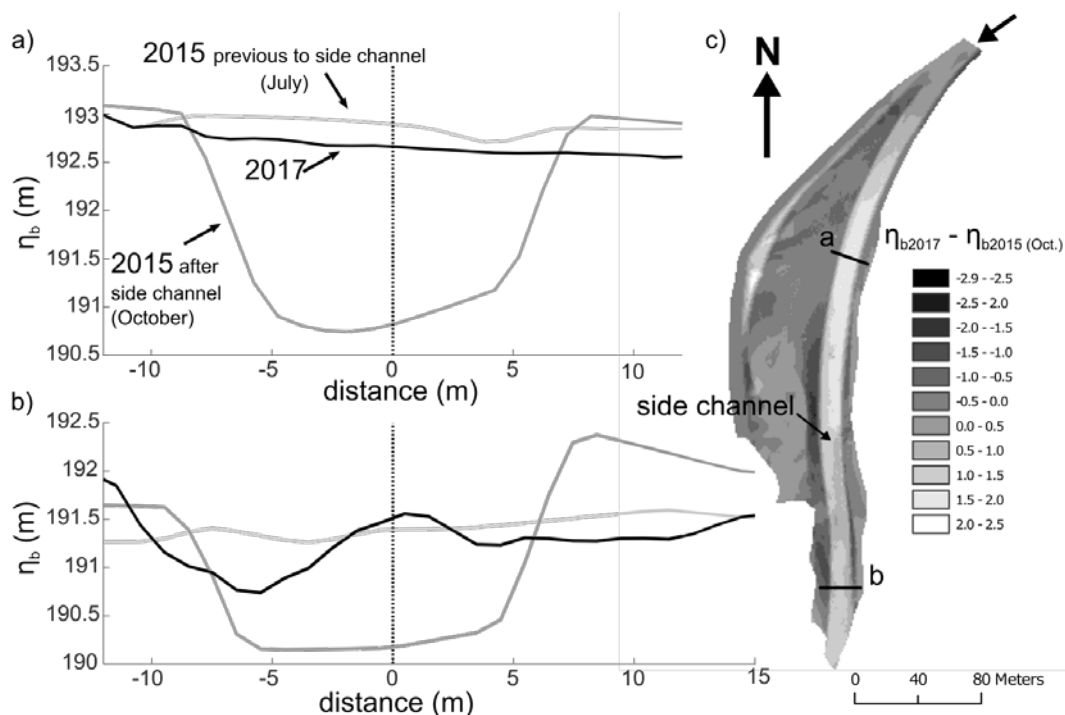


Figura 3-9: a) i b) Canvis de cota en dues seccions al llarg del canal auxiliar. Es mostren les topografies del canal abans i després de construir-se (2015) i després de les crescudes (2017). c) Diferència de cota en metres després de construir el canal i després de les crescudes al tram d'estudi. Font: (Ferrer Boix, et al., 2018)

A la Figura 3-9a) i b) es mostren dues seccions transversals a l'eix del canal auxiliar. En cada secció s'hi representen els perfils de tres anys característics: abans de l'excavació del canal (Juliol del 2015), un cop excavat (Octubre 2015) i dos anys després (2017) amb el canal auxiliar sedimentat. La Figura 3-9c)

representa la variació de la cota des de la construcció del canal (octubre 2015) a l'any 2017, també s'hi localitzen els perfils transversals.

Amb aquesta figura es pot veure com s'ha acumulat sediment al canal auxiliar fins assolir una configuració similar a la que hi havia abans de la construcció del canal (Juliol 2015). Als documents (UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005) i (Ferrer Boix, et al., 2018) s'analitza amb més detall la sedimentació del canal auxiliar.

L'excavació del canal auxiliar provoca que hi hagi una bifurcació i una reunió respecte el riu Gállego. A la Figura 3-10 es poden veure els dos braços generats per la bifurcació, l'esquerre que correspon al canal auxiliar i el dret que correspon al riu Gállego. Al material existent entre els dos braços se l'anomena illa i està marcat de color vermell a la següent figura:



Figura 3-10: Esquema de la bifurcació del cas d'estudi.

3.2.Dades disponibles

A continuació es detallen les dades que es disposen del tram d'estudi; bàsicament es poden classificar en: dades geomètriques, mesures de camp i dades procedents de models hidràulics anteriors.

3.2.1. Topografia

Per poder caracteritzar geomètricament el tram d'estudi i uns metres aigües amunt i aigües avall s'han utilitzat les següents dades:

- Seccions del riu Gállego de l'any 2004 (UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005) fetes a partir de batimetries i el vol *lidar* per les planes d'inundació.

- El Model Digital del terreny (MDT) realitzat abans de les obres d'excavació del canal auxiliar (Juny de 2014) facilitat per l'Ajuntament de Zaragoza.
- El MDT del replanteig de les obres (Juliol del 2015) facilitat per l'Ajuntament de Zaragoza.
- El MDT de les obres acabades (Octubre de 2015) facilitat per l'Ajuntament de Zaragoza.
- Plànols "as-built" del canal auxiliar (Octubre 2015) amb seccions cada 20 metres facilitat per l'Ajuntament de Zaragoza.
- El MDT de l'any 2017 encarregat per l'Ajuntament de Zaragoza expressament per l'informe (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017).
- Seccions del febrer del 2018 gentilesa de Pedro Duarte, investigador de la Universidad de Zaragoza.
- 4 seccions del febrer del 2018 (veure "seccions" de la Figura 3-13).

Les seccions de l'any 2004 comprenen aproximadament els últims 19km del riu Gállego aigües amunt de la desembocadura al riu Ebre, però en aquest treball només s'han utilitzat les seccions que es troben entre 520 m aigües amunt de la bifurcació i la desembocadura del Gállego al riu Ebre, a un quilòmetre i mig aproximadament de la tram d'estudi.

A l'esquerra de la Figura 3-11 es pot veure l'abast de les seccions del 2004 utilitzades (des d'aigües amunt de la bifurcació fins a la desembocadura al riu Ebre) i de totes les dades utilitzades. A la dreta es veu el tram d'estudi ampliat on es distingeixen millor les àrees d'abast dels diferents MDT utilitzats i les seccions realitzades el 2018.

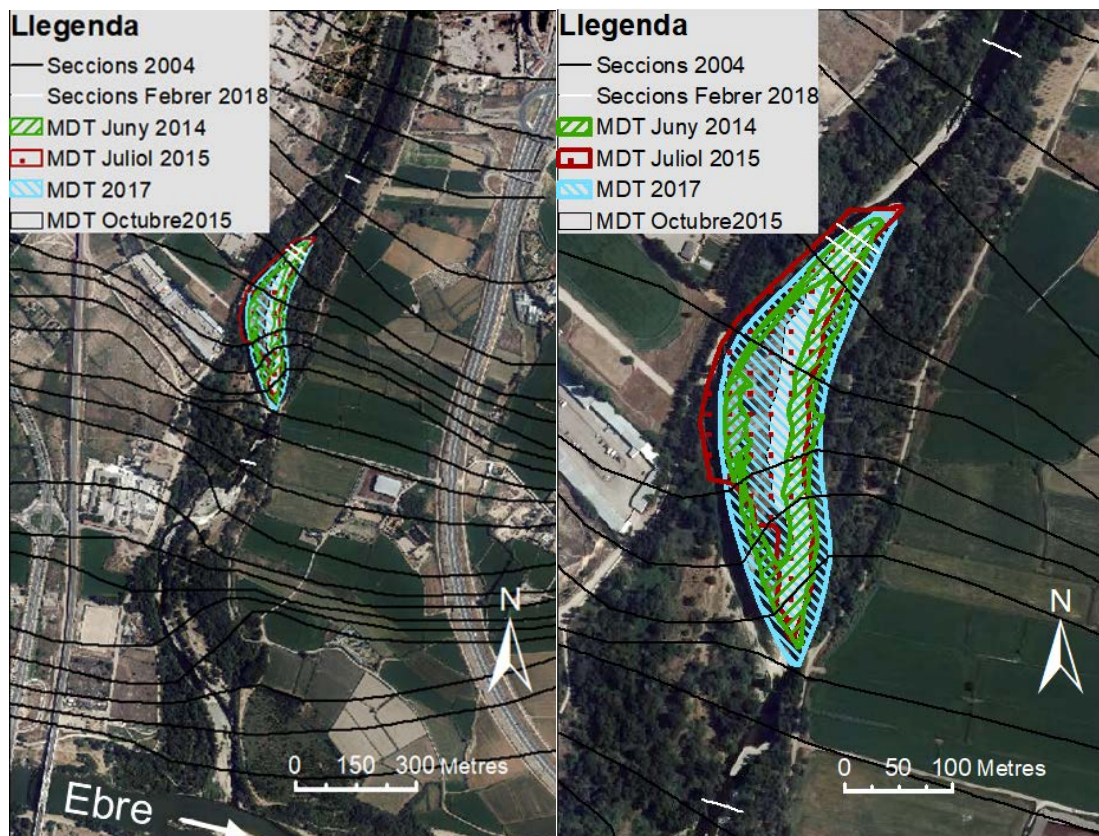


Figura 3-11: Planta amb els MDT i les seccions disponibles. A l'esquerra l'extensió total (les seccions del 2004 utilitzades arriben fins a la desembocadura a l'Ebre) i a la dreta detall de l'àrea d'estudi. Font: elaboració pròpia.

3.2.2. Mesures de camp: cabals - líquid i sòlid-, camp de velocitats i granulometria)

Es disposen de mesures de cabal líquid de l'estació d'aforament A089 del riu Gállego a Zaragoza (Confederación Hidrográfica del Ebro, s.f.) situada a 800 m aigües amunt del tram d'estudi. Les dades que s'han utilitzat són les de l'avinguda del febrer del 2016 i la del novembre del mateix any, sent aquestes les crescudes que van donar lloc a l'acumulació de sediment a la llera auxiliar, ja que entre aquestes dues crescudes el cabal no és suficientment alt com per provocar canvis a la llera.

També es disposa de mesures de cabal sòlid de fons obtingudes amb un aparell Helley-Smith (Figura 3-12) des del pont situat a uns 700 metres aigües amunt del tram d'estudi i immediatament aigües avall de l'estació d'aforament (a la Figura 3-13 es veu la situació en planta del pont). Les mesures es van realitzar durant una crescuda de cabal màxim de $147\text{m}^3/\text{s}$ el 16 de març de 2018 (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017). El pont des d'on es van realitzar les mesures té 30 metres de longitud sense piles al llit del riu i està situat en una lleugera corba al tram canalitzat. Aigües amunt del pont el riu és aproximadament recte. Es van obtenir 66 mostres

de sediment transportat pel fons, les quals es van assecar i garbellar al laboratori per tal d'obtenir la granulometria del cabal sòlid.



Figura 3-12: Aparell de mesures Helley-Smith durant la presa de mostres de fons el dia 16 de març del 2018 per Albert Rovira. Autor: Daniel Ballarín.

A part del cabal líquid i el cabal sòlid de fons, es disposa de mesures de les tres components de la velocitat en una secció aigües amunt de la bifurcació. Aquestes mesures contribueixen a estimar el repartiment del cabal sòlid entre els dos braços de la bifurcació. Aquestes mesures es van prendre el dia 11 de febrer del 2018 a la localització que marca la Figura 3-13b amb el nom de “velocitat”. Les mesures es van realitzar mitjançant un Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) i un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). L’ADV és un aparell que mesura les tres components de la velocitat a punts concrets i l’ADCP és un aparell que registra perfils de velocitats. Durant la mesura de velocitats el cabal del riu a l’estació d’aforament situada 800 metres aigües amunt era molt petit, de 4,43 m³/s.

La granulometria del material que hi ha a la llera, tant superficial com subsuperficial, s’ha obtingut de mostres granulomètriques realitzades al lloc d’estudi. El 17 d’Octubre de 2017 es van recollir 7 mostres granulomètriques de 100 partícules cadascuna segons el mètode de Wolman (Wolman, 1954). Aquest mètode es basa en la recollida i mesura del segon eix major de partícules a cada pas d’un recorregut. A la Figura 3-13 es pot veure la posició de les mostres superficials amb un punt blanc, la distribució és tal que es considera representativa de tot el tram d’estudi.

En quatre d’aquestes posicions es va extreure la capa superficial o cuirassada (capa de material més groller situada a la superfície perquè el material hi ha sigut transportat, entre d’altres coses) i es van obtenir aproximadament 50 kg de material subsuperficial en cadascuna; la posició de les mostres està marcada amb una creu a la Figura 3-13b. Aquest material es va assecar i garbellar a intervals $\frac{1}{2} \psi$ (ψ és el logaritme en base 2 de la mida en mil·límetres). A més a més també es van prendre mostres superficials del llit submergit del riu al llarg de la secció transversal on es van mesurar els camps de velocitats. Es van recollir 50 partícules cada mig metre i se’n va mesurar el segon eix major

(Wolman, 1954): la secció està marcada amb una línia i es localitza amb el número 8^(*) (Ferrer Boix, et al., 2018) a la Figura 3-13b.

Per poder veure com es van sedimentar les diferents capes de material al·luvial (estratigrafia) durant les avingudes del febrer i del novembre del 2016 es va realitzar una rasa d'un metre d'ample, d'aproximadament 11 metres de longitud i 1,5 metres de profunditat. La rasa, està localitzada uns 143 metres aigües avall de l'inici del canal auxiliar. A la Figura 3-13 b) està marcada amb una línia negra.

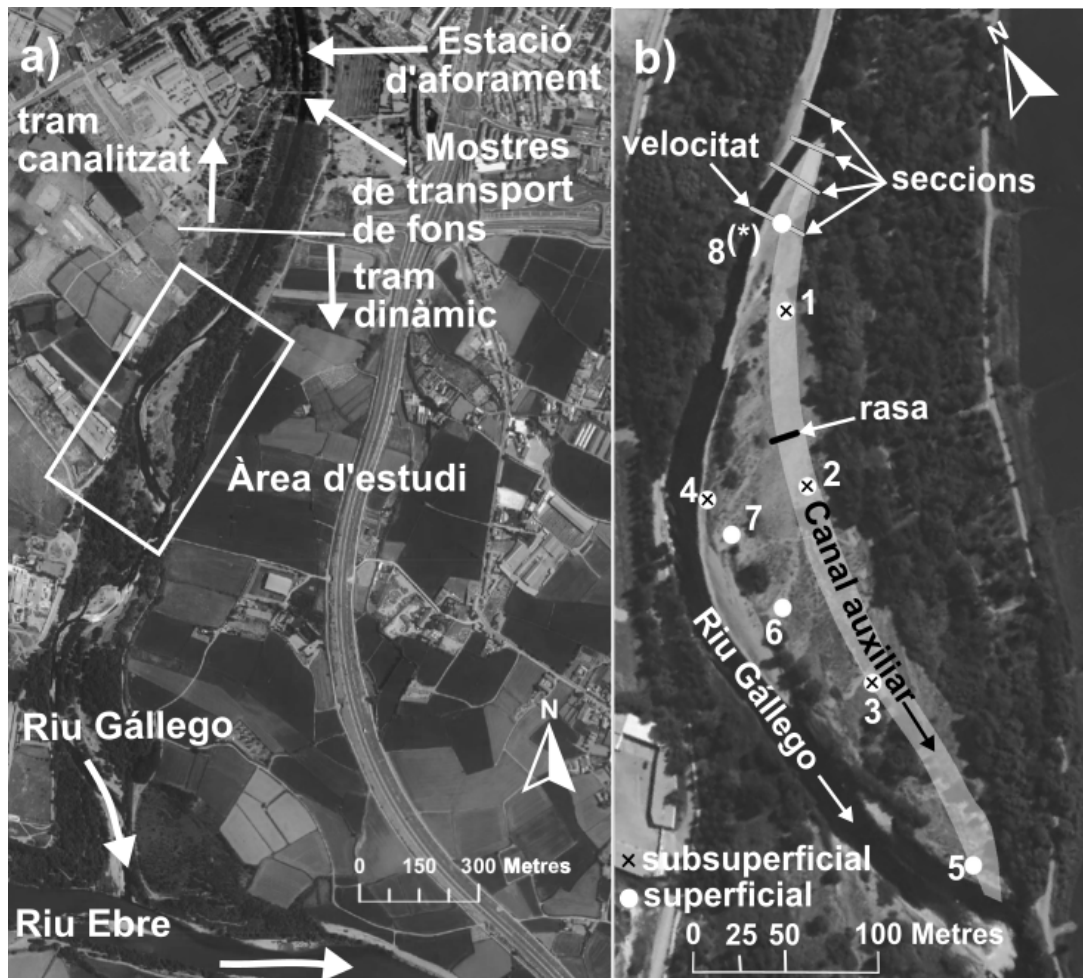


Figura 3-13: Localització de les mesures de camp a l'àrea d'estudi. Font: elaboració pròpia.

A la Figura 3-14 estan representades les distribucions granulomètriques de les mostres subsuperficials (*volumètriques*) i superficials (*superficials*) posicionades en planta a la Figura 3-13 b). La numeració de les mostres de les dues figures és correlativa. Les diferències són que a la Figura 3-13b) no apareixen les mostres del 2004: MV-1 (2004) i MS-1 (2004) i que la mostra MS-XS-ADV de la Figura 3-14 correspon al número 8 (*). La dispersió granulomètrica de les mostres superficials és de 1,78 i la de les subsuperficials de 3,45.

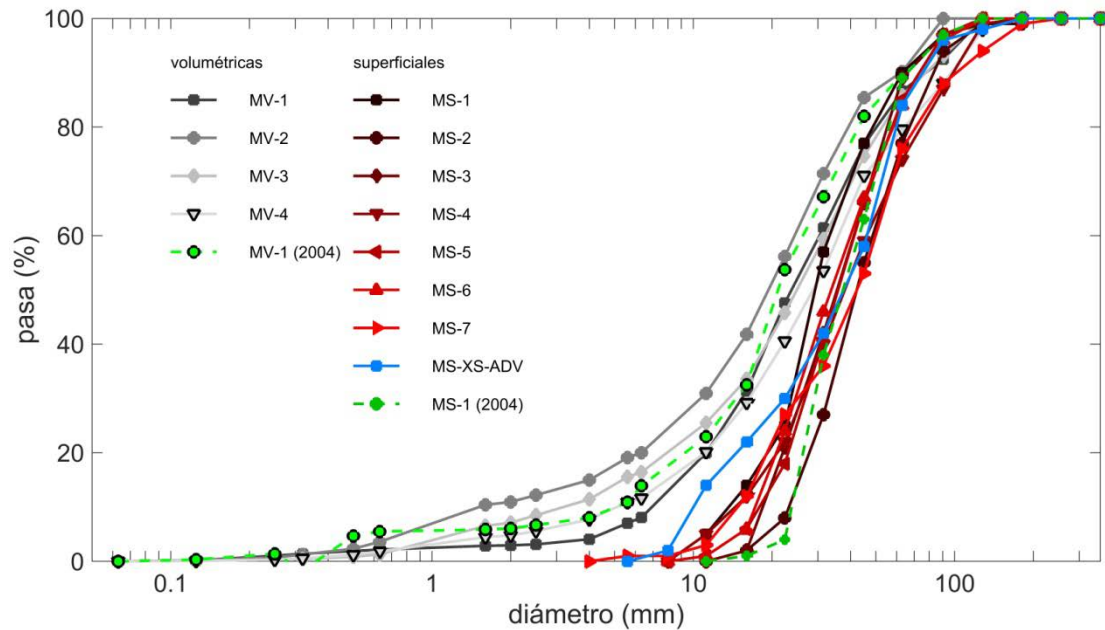


Figura 3-14: Representació gràfica (corbes granulomètriques) de les mostres superficials (MS) i volumètriques o subsuperficials (MV) de la Figura 3-13. Els números de les mostres són els mateixos a les dues figures, a excepció de la mostra MS-XS-ADV que és la mostra 8(*) i les mostres MV-1 (2004) i MS-1 (2004) que no apareixen. Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017)

3.2.3. Dades procedents de models hidràulics anteriors

Per determinar com es divideix el cabal, és a dir, quantificar el cabal que passa pel braç del riu i el que passa pel braç del canal auxiliar aigües avall de la bifurcació s'ha utilitzat el Model que es va realitzar el 2004 amb HEC-RAS, però amb modificacions de la geometria al tram d'estudi per incorporar el canal auxiliar, la nova geometria del riu, l'efecte de la transmissió de cabals entre el braç del riu i el canal i l'efecte de la sedimentació del canal en el repartiment de cabals. S'ha de destacar que aquest model es va realitzar per estudiar la inundació i no tenia com objectiu l'anàlisi morfodinàmic (UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005).

4. Model numèric

A continuació es presenta el model numèric amb les seves equacions, hipòtesis, simplificacions i comprovacions. Així com la configuració del cas d'estudi per tal de simular el comportament de la llera auxiliar.

El model 1D està compost bàsicament per dos mòduls. El primer serveix per calcular la hidràulica, mentre que l'altre calcula els canvis en la cota del fons de la llera i les seves distribucions granulomètriques a partir del cabal sòlid que pot transportar el riu. Els dos mòduls es retroalimenten, ja que a partir dels valors obtinguts al primer mòdul s'obtenen els cabals sòlids, les noves cotes de fons i les granulometries de la llera i del transport de fons del segon mòdul, que s'utilitzaran com a noves dades d'entrada del primer mòdul en el següent instant de temps. Tot i així, els dos mòduls no estan acoblats.

Els càlculs del segon mòdul, en el que obtenim el cabal sòlid en un instant de temps i les variacions de la cota del fons de la llera i la granulometria de l'instant de temps següent, estan fets per cada node (és a dir a cada abscissa al llarg de la llera). Aquest també és el cas dels càlculs del primer mòdul, responsable de la part hidràulica del model numèric. És a dir que els càlculs es fan en un bucle espacial que recorre tots els nodes del domini. Tanmateix, en el segon mòdul cal afegir un altre bucle d'iteracions que recorri cadascuna de les classes granulomètriques de què està formada la llera del riu. A la Figura 4-1 es pot veure l'esquema del model. La justificació de l'ordre de càlcul dels nodes s'explicarà als apartats següents.

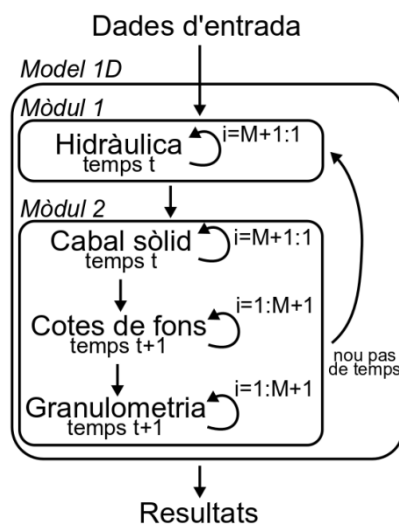


Figura 4-1: Esquema del model 1D. La lletra *i* indica el node i *M+1* és el número total de nodes del domini espacial. Font: elaboració pròpia.

A cada node de càlcul es defineix una geometria inicial de la secció que s'anirà actualitzant en funció dels canvis a la cota del fons obtinguts al segon mòdul del model numèric. Inicialment es defineix un pendent longitudinal entre nodes, però en els càlculs successius és aquesta cota del fons de la llera en cada node el que

defineix el pendent longitudinal entre dos nodes consecutius. A l'apartat 4.2.1 es descriu amb més detall la geometria i les variables que la defineixen.

4.1.Equacions

La hidràulica està governada per l'equació del flux gradualment variat. Mentre que els canvis en la cota del fons estan controlats per l'equació d'Exner o de conservació de la massa de sediment a partir del transport de fons.

4.1.1. Flux Gradualment Variat

El calat d'aigua s'obté suposant flux gradualment variat (GVF). Això el que vol dir és que el flux no és uniforme i que els canvis que es produeixen en el calat i en totes les variables del flux són graduals. El calat d'aigua (y) està calculat a cada node i a cada instant de temps.

El càlcul depèn del nivell del calat a cada node, ja que pot ser que sigui inferior a la profunditat de la llera principal i per tant el cabal d'aigua estigui contingut en ella o que pel contrari, sigui superior a la seva profunditat i que l'aigua sobresurti ocupant les planes d'inundació. A la Figura 4-2 es poden veure les 3 situacions possibles: l'aigua continguda a la llera principal (Situació 1), l'aigua ocupant completament les planes d'inundació (Situació 3) o una situació intermèdia (Situació 2).

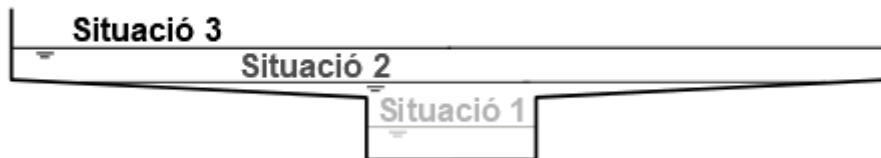


Figura 4-2: Secció transversal on es mostren les 3 possibles situacions del nivell d'aigua.

Considerant que la variació d'energia al llarg dels diferents nodes és igual a les pèrdues friccional, l'equació diferencial ordinària de primer ordre no lineal pel flux gradualment variat pot expressar-se com:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S - S_f}{1 - F_r^2} = G(y) \quad (1)$$

on,

S és el pendent del fons i que s'obté a partir de les cotes del fons de la llera. Si la cota del fons varia amb el temps, el pendent també pot variar.

S_f és el pendent motriu, que s'obté amb l'equació (2).

F_r és el número de Froude, que relaciona les forces d'inèrcia i les forces de gravetat que actuen en un fluid. Del calat que fa que sigui igual a la unitat ($F_r = 1$) se'n diu calat crític (y_c), veure l'equació (3).

A continuació es presenta l'equació per calcular el pendent motriu:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \quad (2)$$

on,

Q és el cabal líquid en m³/s.

K és la capacitat de transportar aigua (*conveyance*), que es defineix segons l'equació(4).

A continuació es presenta l'equació per obtenir el número de Froude juntament amb la condició que compleix el calat crític (y_c):

$$F_r = \frac{Q^2 T(y)}{\sqrt{g A(y)^3}}, \quad F_r(y_c) = 1 \quad (3)$$

on,

T és l'ample de la làmina d'aigua en m. Quan la secció és composta depèn del calat d'aigua (y).

g és la gravetat (9,81m/s²).

A és l'àrea mullada en m². La seva expressió depèn de si el calat d'aigua ocupa o no les planes d'inundació (veure la Taula 4-1).

A continuació es presenta l'equació per calcular la *conveyance*:

$$K = \frac{A R_h^{2/3}}{n_{eq}} \quad (4)$$

on,

R_h és el radi hidràulic que s'obté dividint l'àrea entre el perímetre mullat com es mostra a l'equació (5).

n_{eq} és el coeficient de Manning equivalent tenint en compte el coeficient de Manning de la llera i de les planes ponderat pel perímetre mullat de cada zona (Martín Vide, 2002) segons l'equació (6).

A continuació es presenta l'equació per obtenir el radi hidràulic que depèn de les expressions de l'àrea i del perímetre mullat presentades a la Taula 4-1.

$$R_h = \frac{A}{P_w} \quad (5)$$

on,

P_w és el perímetre mullat en metres. La seva expressió, com l'àrea, depèn de si el nivell d'aigua ocupa o no les planes d'inundació (veure la Taula 4-1).

A continuació es presenta l'expressió utilitzada per calcular el coeficient de Manning equivalent:

$$n_{eq} = \left(\frac{\sum P_{wj} n_j^{3/2}}{P_w} \right)^{2/3} \quad (6)$$

El subíndex j de l'equació (6) indica les diferents subdivisions de cada secció transversal. En el nostre cas considerem que hi ha dues subdivisions, una corresponent a les planes d'inundació i l'altra a la llera principal. És a dir que considerem que la llera i les planes d'inundació tenen rugositats diferents. Això acostuma a ser habitual ja que a les planes d'inundació acostuma a haver-hi vegetació, mentre que a la llera només hi ha material al·luvial. És a dir que el coeficient de Manning és menor a la llera que a les planes d'inundació.

En aquest cas que volem simular del canal auxiliar excavat al Gállego el coeficient de Manning (n), tant a les planes d'inundació com a la llera, és funció del D_{90} de la granulometria de la superfície (diàmetre del material que deixa passar un 90% del total) d'on es vol obtenir el coeficient, ja que a l'excavar-se el canal auxiliar es van remoure les graves i no quedà vegetació a les planes d'inundació del canal. El coeficient de Manning es calcula segons la fórmula coneguda com de Manning-Strickler (Bownlie, 1983) amb els coeficients de (Kamphuis, 1974):

$$n = \frac{(2D_{90})^{1/6}}{8,1 \sqrt{g}} \quad (7)$$

A continuació es descriuen les fórmules per l'àrea i el perímetre mullat per les tres situacions presentades a la Figura 4-2 en funció de si l'aigua ocupa només la llera principal (Situació 1), omple tota la secció (Situació 3) o es queda en una àrea de transició entre la llera principal i omplint totes les planes d'inundació (Situació 2).

Taula 4-1: Expressions de l'àrea i del perímetre mullat per una secció composta en funció de les diferents situacions descrites al paràgraf anterior i a la Figura 4-2. Font: elaboració pròpia.

Situació	Àrea	Perímetre mullat
1	$A = B_{ll}y$	$P_w = B_{ll} + 2y$
2	$A = B_{ll}y + \frac{(y - h_{ll})^2}{s_{pl}}$	$P_w = B_{ll} + 2 \left[h_{ll} + \sqrt{(y - h_{ll})^2 \left(1 + \frac{1}{s_{pl}^2} \right)} \right]$
3	$A = B_{ll}y - B_{pl}^2 s_{pl} + (y - h_{ll})2B_{pl}$	$P_w = B_{ll} + 2 \left[y + B_{pl} \left(\sqrt{1 + s_{pl}^2} - s_{pl} \right) \right]$

La nomenclatura dels diferents paràmetres està descrita a la Figura 4-12 a l'apartat 4.2.1.

L'equació (1) del GVF necessita una condició de contorn, a part del cabal d'entrada, que depenent del règim del flux serà necessària aigües amunt o aigües avall (Sánchez Juny, et al., 2005):

- Si el règim és ràpid ($F_r > 1$), l'equació (1) s'ha d'integrar cap aigües avall i per tant cal imposar una condició de contorn a l'extrem d'aigües amunt.
- Si el règim és lent ($F_r < 1$), l'equació (1) s'ha d'integrar cap aigües amunt i per tant hem d'imposar una condició de contorn a l'extrem inferior.
- Si el règim és crític ($F_r = 1$) el denominador s'anul·la i es creen problemes numèrics. A la naturalesa aquest règim és inestable.

La relació entre el calat normal (y_n) i el calat crític estableix diferents tipologies de canals (Sánchez Juny, et al., 2005). En aquest treball s'estudiaran bàsicament situacions amb el pendent moderat, que dona lloc a corbes de rabeig tipus M, on el calat normal és major al calat crític. També es produeixen situacions amb pendent advers o horitzontal i en aquests casos no existeix el calat normal. Entenent com a calat normal aquell que es produeix en règim uniforme, quan el pendent del fons i el motriu són iguals, i que s'assoleix a lleres amb secció transversal prismàtica. Quan la secció transversal és rectangular, té expressió unívoca i es pot calcular tot utilitzant l'equació de Manning (8).

$$Q - \frac{1}{n} A(y_n) R_h(y_n)^{2/3} S^{1/2} = 0 \quad (8)$$

El calat crític, igual que amb el calat normal, té solució única en el cas de lleres rectangulars (3).

S'ha de tenir en compte que al tractar-se d'una secció composta, és a dir formada per una llera principal i dues planes d'inundació, no hi ha una solució única de calat crític o calat normal (Subramanya, 1997) com es pot veure a la Figura 4-3. En d'altres documents, per exemple al (Lee, et al., 2002), es parla d'una zona de transició entre règim subcrític i supercrític, de manera que no es pot parlar d'un únic valor de calat crític. Ja que, tot i que sí que hi ha dues situacions on la totalitat de la secció composta està en règim subcrític o supercrític, hi ha una franja de calats on la llera principal està amb règim subcrític i en canvi les planes estan en règim supercrític. Per això es parla de zona i no d'un valor de calat.

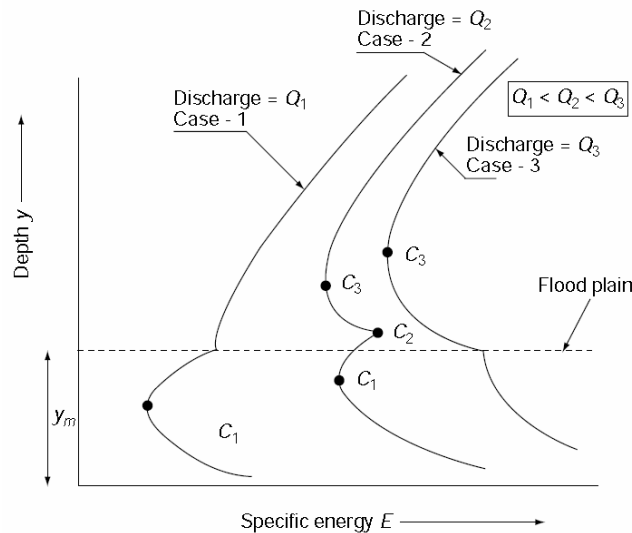


Figura 4-3: Esquema de la variació de l'energia en funció del calat en una secció composta simètrica. En el cas de secció rectangular només hi ha un mínim de la funció, seria com la línia de més a l'esquerra sense considerar el tram on el calat ocupa les planes d'inundació (flood plain). Font: (Subramanya, 1997)

A la Figura 4-4 es descriuen les tres possibles corbes tipus M que existeixen.

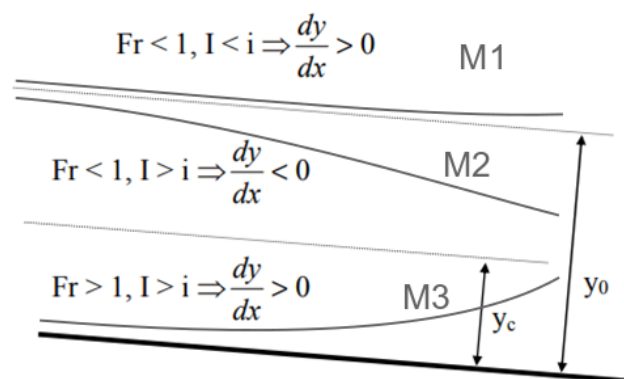


Figura 4-4: Caracterització de les diferents regions que es diferencien en un canal tipus M. Font: Modificat de (Sánchez Juny, et al., 2005).

La corba tipus M1 és aquella que aigües amunt tendeix al calat normal i que la derivada del calat és positiva, és a dir que augmenta el calat amb la coordenada longitudinal del riu. El calat és més gran com més aigües avall.

La corba tipus M2 és aquella que aigües amunt tendeix al calat normal i que la derivada del calat és negativa, és a dir que el calat disminueix amb la coordenada longitudinal del riu. El calat disminueix com més aigües avall i té com a límit el calat crític.

La corba tipus M3 és aquella que la derivada del calat és positiva, és a dir que el calat augmenta longitudinalment al riu. El calat és més gran com més aigües avall, tendint a ser perpendicular a la solera del riu i a la línia del calat crític. A l'extrem teòric aigües amunt la làmina d'aigua intercepta amb la solera. Per tant, teòricament en aquest extrem la corba M3 no existeix.

L'equació del GVF és no lineal; per obtenir el calat a cada punt del domini i en cada instant de temps es busquen les arrels de l'equació (1) $\left(\frac{dy}{dx} - G(y) = 0\right)$ resolent la corba de rabeig per diferències finites utilitzant el mètode de Kutta-Merson. Aquest algoritme és una variant del clàssic mètode Runge-Kutta de quart ordre per resoldre equacions diferencials ordinàries. Es tracta del mètode numèric que ha donat més bons resultats en el càlcul del calat ja que evita inestabilitats en seccions compostes (Subramanya, 1997).

La corba de rabeig o el perfil longitudinal de la làmina d'aigua es calcula per cada pas de temps. Cal doncs integrar l'equació (1) tot usant el mètode de Kutta-Merson per així obtenir el calat, y , en cada instant. A continuació es presenta el mètode:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{2}(K_1 + 4K_4 + K_5) \quad (9)$$

on,

y és el calat a un node concret (i) o al node següent ($i + 1$); el node següent serà aigües amunt o aigües avall depenent de si és règim subcrític o supercrític, respectivament.

K_1, K_4 i K_5 , tot i estar representats per la lletra K, no tenen res a veure amb la *conveyance* sinó que fan referència als diferents coeficients del mètode Kutta-Merson que es presenten a continuació:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{1}{3}\Delta x G(y_i) \\ K_2 &= \frac{1}{3}\Delta x G(y_i + K_1) \\ K_3 &= \frac{1}{3}\Delta x G\left(y_i + \frac{K_1}{2} + \frac{K_2}{2}\right) \\ K_4 &= \frac{1}{3}\Delta x G\left(y_i + \frac{3}{8}K_1 + \frac{9}{8}K_3\right) \\ K_5 &= \frac{1}{3}\Delta x G\left(y_i + \frac{3}{2}K_1 - \frac{9}{2}K_3 + 6K_4\right) \end{aligned} \quad (10)$$

on,

Δx és la discretització espacial, és a dir, la distància entre dos nodes consecutius.

Per reduir les inestabilitats i obtenir resultats més exactes, quan el calat que s'utilitza per obtenir els coeficients de Kutta-Merson és negatiu, s'ha fet un refinament espacial. Entenen com a refinament espacial, realitzar més subdivisions entre dos nodes consecutius.

Per evitar inestabilitats numèriques, l'equació del gradualment variat només s'ha utilitzat quan el número de Froude és inferior a 0,7. Quan aquest és superior s'imposa el calat crític corresponent. Cal resoldre l'equació (3) per obtenir-ho.

Aquest càlcul es fa tot usant el mètode de la bisecció (quan la secció transversal és composta –llera i planes d'inundació- l'equació (3) no és explícita). Aquest mètode és un algoritme per trobar arrels aproximades d'equacions contínues no lineals i implícites. Consisteix en trobar dues aproximacions inicials de la solució, cada una amb un signe diferent i es va millorant l'aproximació fins que la diferència entre el resultat positiu i negatiu és inferior a una tolerància imposada.

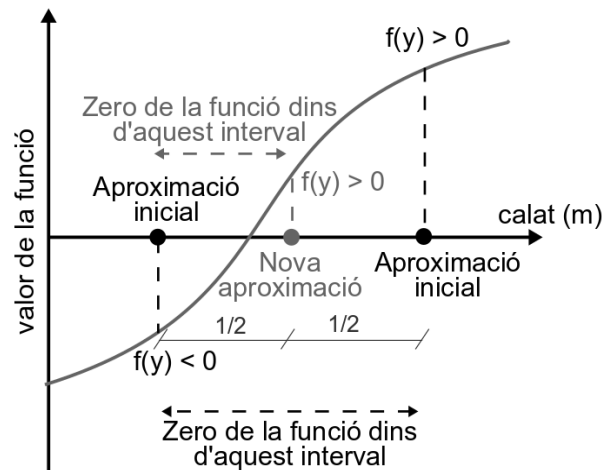


Figura 4-5: Explicació del mètode de la bisecció. Font: elaboració pròpia.

En aquest treball s'agafa, com a primera aproximació inicial, el calat a partir del qual l'aigua ja ocupa completament les planes d'inundació. En funció de si la funció dóna un valor positiu o negatiu es disminuirà o s'augmentarà el calat respectivament per trobar el valor de la segona aproximació inicial de signe oposat.

Un cop ja s'han obtingut les dues aproximacions inicials s'obindrà un nou valor de la funció agafant com aproximació la meitat de les dues primeres aproximacions. En funció del signe del valor que té la funció amb aquesta tercera aproximació es substituirà per una de les dues aproximacions inicials. Per exemple, si el signe del valor que s'obté a partir de la mitjana de les dues primeres aproximacions és negatiu, es substituirà aquesta tercera aproximació per la inicial que tenia signe negatiu. I es procedirà a calcular una nova aproximació amb la mitjana de la aproximació inicial restant i de la tercera aproximació i així successivament s'anirà reduint l'interval on es troba el zero de la funció.

El mètode de la bisecció també s'aplica quan es calcula el calat normal en secció composta a partir de l'equació (8). Com abans, es tracta d'una equació no lineal i implícita.

A continuació es mostren dos exemples, un pel calat crític i l'altre pel calat normal, on es poden veure les representacions de les funcions de les quals es busca el zero mitjançant el mètode de la bisecció per trobar els valors del calat crític i el calat normal respectivament. En tots dos casos hi ha tres solucions possibles:

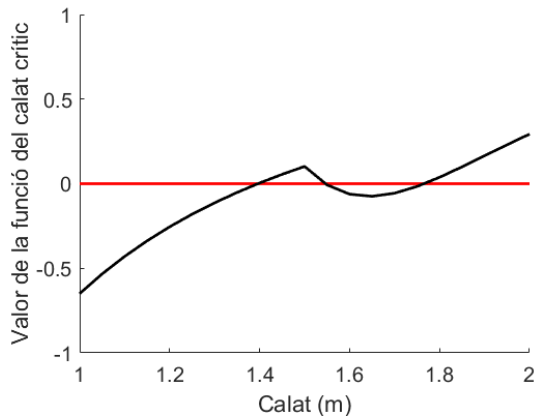


Figura 4-6: Exemple on hi ha tres solucions possibles de calat crític. $Q=62\text{m}^3/\text{s}$. Profunditat de la llera de 1,5m. Pendent transversal de les planes 0,02. Amplada de les planes de 50 m.

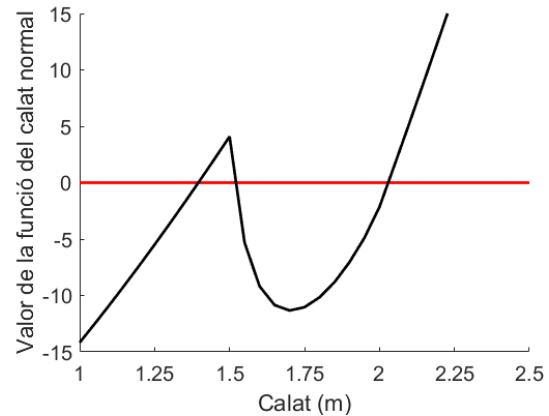


Figura 4-7: Exemple on hi ha tres possibles solucions de calat normal. $Q=35\text{m}^3/\text{s}$. Profunditat de la llera de 1,5m. Pendent transversal de les planes 0,02. Amplada de les planes de 50 m. Coeficient de Manning 0,026. Pendent del fons 0,0025.

4.1.2. Conservació de la massa (Exner)

Un cop resolta la hidràulica per tots els nodes en un pas de temps donat (mòdul 1 de la Figura 4-1), es calcula la variació de la cota del fons a partir del balanç del cabal sòlid i la nova granulometria del fons que serviran de dada d'entrada per calcular la hidràulica en el següent instant de temps, és a dir que es resol el problema amb els dos sistemes desacoblats. Però, a cada pas de temps el càlcul hidràulic de la corba de rabeig influeix en el càlcul del perfil longitudinal de la llera, que alhora afectarà en la corba de rabeig de l'instant següent.

A continuació es presenta l'equació d'Exner per a la conservació de la massa de sediment. El que s'imposa és que el gradient temporal de cotes (considerant la porositat, λ_p) sigui igual i de signe contrari al gradient espacial del cabal sòlid, és a dir que si per exemple hi ha una disminució del transport de fons entre dos nodes, aquest material s'acumula a la llera i es transforma en un increment de la cota del fons en el següent instant de temps. D'aquesta manera s'assegura la conservació de la massa.

$$(1 - \lambda_p) \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial q_{sT}}{\partial x} \quad (11)$$

on,

λ_p és la porositat que es considera constant i de valor 0,4.

η és la cota del fons de la llera en m.

q_{sT} és el cabal sòlid total, entenent com a total la suma dels cabals de totes les fraccions granulomètriques (18).

L'equació d'Exner (11) només s'imposa a la llera principal, ja que només es permet que s'acumuli o s'erosioni el material en ella. Això implica que no hi ha transport de fons a les planes d'inundació, on les tensions de fons són menors

que a la llera. Com a conseqüència, la profunditat de la llera, i per tant l'altura relativa de les planes d'inundació respecte el fons de la llera, varia de tal manera que si la llera s'erosiona augmenta i si per contra s'acumula material es redueix. La variació es produeix tant espacialment, al llarg dels diferents nodes, com temporalment.

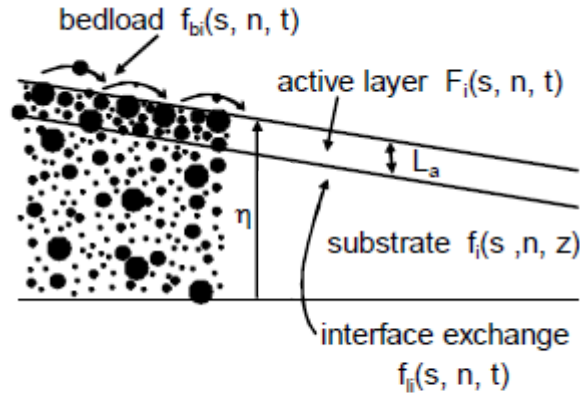


Figura 4-8: Esquema de la definició de capa activa. Font: (ASCE , 2008)

Es considera que el transport de fons es produeix en el que es coneix com a capa activa (L_a). La capa activa (*active layer* en anglès, Figura 4-8) és defineix verticalment i la conformen els primers decímetres del llit del riu. La seva magnitud s'acostuma a definir proporcionalment al D_{90} de la granulometria superficial de la llera. En aquest cas es defineix com dues vegades el D_{90} de la granulometria superficial de la llera. El gruix de la capa activa varia espacialment i temporalment en funció de la variació de la granulometria superficial de la llera.

Abans d'explicar en detall com es calculen els dos termes de l'equació d'Exner es fa un petit incís a com es consideren les mescles de sediment a la llera.

La granulometria del cabal sòlid d'entrada, de les planes i de la llera, tant superficial, com subsuperficial es defineix a partir d'una funció de densitat de probabilitat que no és altra cosa que una corba granulomètrica. Aquesta corba ve definida a partir del percentatge de material al·luvial que passa per una sèrie de garbells determinats. L'obertura dels garbells està associada a les classes amb les que es discretitza la corba granulomètrica. Aquestes estan definides pel seu diàmetre D . Els diàmetres es converteixen a la coneguda escala ψ (Parker & Andrews, 1985):

$$\psi = \frac{\ln(D)}{\ln(2)} \quad (12)$$

Un cop convertits els diàmetres dels garbells a l'escala ψ es calcula la funció de la densitat de probabilitat. Aquesta funció es calcula en forma discreta, de manera que el que passa entre dos garbells consecutius, que se n'anomena classe, és la freqüència (o probabilitat) mostral. A cada freqüència s'assigna un diàmetre característic, que en l'escala ψ és la semi-suma del diàmetre inferior i superior (en escala ψ). La suma de totes les probabilitats ha de sumar la unitat.

Quan es parla de D_{16} , D_{50} , D_{84} , D_{90} , entre d'altres, es fa referència al diàmetre que deixa passar un 16, 50, 84 i 90% de la mostra, respectivament. El diàmetre de la mitjana geomètrica de la distribució granulomètrica D_g s'obté de la següent manera:

$$D_g = 2^{\psi_m} \quad (13)$$

$$\psi_m = \int \psi p(\psi) d\psi \quad (14)$$

on,

$p(\psi)$ és la funció de densitat de probabilitat.

ψ_m és el diàmetre mig en l'escala ψ .

Les granulometries de les mescles es poden diferenciar per la seva desviació geomètrica. La desviació geomètrica de la granulometria determina la dispersió de la mostra. Una mostra granulomètrica amb una desviació geomètrica unitària significa que tota la mostra té el mateix diàmetre. Com més gran sigui el valor de la desviació geomètrica, major serà la dispersió i més diferencia hi haurà entre el diàmetre menor i el major de la mostra. A continuació es mostra la fórmula:

$$\sigma_g = 2^\sigma \quad (15)$$

$$\sigma^2 = \int (\psi - \psi_m)^2 p(\psi) d\psi \quad (16)$$

Tornant a l'equació d'Exner (11), que s'ha presentat per la suma de totes les fraccions granulomètriques, s'ha discretitzat per diferències finites i s'ha aïllat el valor de la cota de fons al següent instant de temps ($t+1$) en funció del temps actual (t) per tal de resoldre-la:

$$\eta_i^{t+1} = \eta_i^t - \frac{1}{1 - \lambda_p} \left. \frac{\partial q_{sT}}{\partial x} \right|_i \Delta t \quad (17)$$

on,

Δt és un increment de temps en segons, s'utilitzarà un increment de 15 segons ja que s'ha vist que és adequat per les simulacions realitzades en aquest treball.

El gradient del cabal sòlid total a un node determinat ($\left. \frac{\partial q_{sT}}{\partial x} \right|_i$) es calcula com la suma del gradient del cabal sòlid de totes les classes granulomètriques d'aquell node. Aquest s'obté discretitzant-lo per diferències finites de segon ordre. S'ha definit l'equació de manera que canviant el coeficient a_u poden ser diferències finites cap endavant ($a_u = 0$), cap endarrere ($a_u = 1$), centrades ($a_u = 0,5$) o situacions intermèdies.

$$\left. \frac{\partial q_{s,k}}{\partial x} \right|_i = a_u \frac{q_{s,i,k} - q_{s,i-1,k}}{\Delta x} + (1 - a_u) \frac{q_{s,i+1,k} - q_{s,i,k}}{\Delta x} \quad (18)$$

L'anterior equació té un parell de casos particulars, els dos nodes extrems. En el cas d'aigües amunt el cabal sòlid del node anterior s'imposarà el cabal sòlid d'entrada. A l'últim node es calcula la derivada amb diferències finites endarrere.

El cabal sòlid de cada classe granulomètrica (q_{s_k}) es calcula a partir de l'expressió de la capacitat de transport de Meyer-Peter i Müller (Meyer-Peter & Müller, 1948) modificada per Wong i Parker (Wong & Parker, 2006) i adaptada per mescles (ASCE , 2008):

$$q_{s_{i,k}}^t = F_{i,k}^t \sqrt{RgD_k} D_k^{3,97} \left(\tau_{i,k}^{*t} - \tau_{c_{i,k}}^{*t} \right)^{1,5} \quad (19)$$

on,

$q_{s_{i,k}}^t$ és el cabal sòlid unitari de la classe granulomètrica k , al node i en l'instant de temps t .

$F_{i,k}^t$ és la fracció de material al·luvial a la capa activa de la classe granulomètrica k , al node i en l'instant de temps t .

R és la relació entre la densitat del sediment i la de l'aigua (1,65).

D_k és el diàmetre característic de la classe granulomètrica k .

$\tau_{i,k}^{*t}$ és la tensió del fons adimensional per la classe granulomètrica k , al node i a l'instant de temps t .

$\tau_{c_{i,k}}^{*t}$ és la tensió crítica de fons, adimensional, per la classe granulomètrica k , al node i a l'instant de temps t .

Per obtenir la tensió crítica de fons en cada instant de temps, en cada node i per cada classe granulomètrica s'ha utilitzat la relació modificada d'Egiazaroff (Egiazaroff, 1965) que té en compte el fenomen d'exposició i ocultament. Aquest fenomen considera que el sediment de la llera d'un riu (format per partícules de materials diferents) no es mourà com ho faria si estigués format per partícules d'una única mida o diàmetre, a més a més de considerar la interacció entre els diferents diàmetres.

Les partícules més grolleres ($\frac{D_k}{D_m} > 1$), de mida més gran que el diàmetre mig (D_m), es mouran menys que considerant que la llera és de material uniforme amb diàmetre D_m . Per altra banda les partícules més petites ($\frac{D_k}{D_m} < 1$) es mouran més, la línia de la funció modificada d'Egiazaroff de la Figura 4-9 ha incrementat respecte de la línia horitzontal augmentat l'àrea de moviment del material.

Si en lloc de comparar-ho amb la línia horitzontal del mig de la figura, que representa que la tensió de fons de tots els diàmetres és igual a la del diàmetre D_m , ho comparem amb la diagonal veiem que el comportament és diferent. La línia diagonal representa que la tensió crítica a cada diàmetre n'és directament proporcional.

En aquest cas, la funció modificada d'Egiazaroff determina que les partícules més grolleres es mouran més quan estan envoltades de partícules més petites que quan estan elles soles, ja que estan més exposades i per tant seran més fàcils de desplaçar (fenomen d'exposició). La línia contínua de la Figura 4-9 augmenta l'àrea de moviment respecte la diagonal pels materials més grollers.

Per contra, les partícules més petites quan estan amb partícules més grans costaran més de moure que si estiguessin soles, ja que queden resguardades pel material més groller (fenomen d'ocultament). Com es veu a la Figura 4-9 els diàmetres inferiors al diàmetre mig tenen valors per sota de la diagonal, és a dir inferiors al valor de la tensió crítica calculada directament amb el diàmetre sense considerar el fenomen d'ocultament.

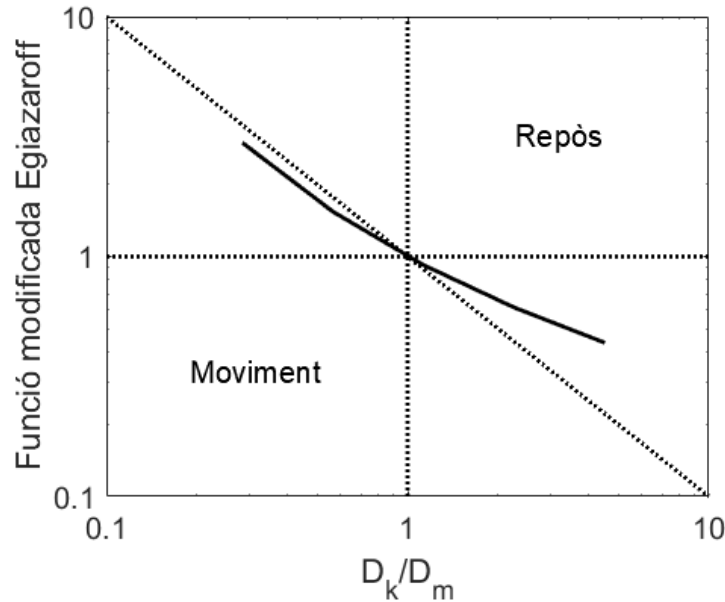


Figura 4-9: Representació de la relació modificada d'Egiazaroff. Font: elaboració pròpia.

A continuació es mostra la fórmula de la relació modificada d'Egiazaroff per calcular les tensions crítiques d'inici de moviment per cadascuna de les fraccions de què es compona la mescla i que es calculen d'una manera o d'una altra depenent de la relació del diàmetre característic amb el diàmetre mig.

$$\tau_{c_k}^* = \begin{cases} \tau_c^* 0,843 \left(\frac{D_k}{D_m} \right)^{-1} & \text{si } \frac{D_k}{D_m} \leq 0,4 \\ \tau_c^* \left[\frac{\log(19)}{\log\left(19 \frac{D_k}{D_m}\right)} \right]^2 & \text{si } \frac{D_k}{D_m} > 0,4 \end{cases} \quad (20)$$

on,

τ_c^* és la tensió crítica de Shields considerant material uniforme (0,0495).

D_m és el diàmetre mig de les fraccions granulomètriques de la superfície de la llera en un node i temps determinat. Es calcula de la següent manera:

$$D_m = \sum_{k=1}^{k=p} D_k F_k \quad (21)$$

on p és el número de fraccions granulomètriques

La tensió de fons s'obté de la següent manera:

$$\tau = \rho g R_h S_f \quad (22)$$

on es considera únicament el radi hidràulic de la llera, ja que és on es produeixen els canvis (on hi ha transport de fons). És a dir, que es calcula a partir de l'àrea d'aigua sobre de la vertical de la llera principal i considerant el perímetre mullat de la llera, sense incloure el perímetre mullat de les planes ni l'aigua que fa de frontera fictícia entre la columna d'aigua de les planes i la de la llera.

S'ha de tenir en compte que es considera un únic pendent motriu per tota la secció. Això s'explicarà a l'apartat 4.2 on es parla de les simplificacions i les hipòtesis.

Les tensions de fons adimensionals s'obtenen:

$$\tau^*_k = \frac{\tau}{\rho g R D_k} \quad (23)$$

Un cop realitzat els càlculs de cabal sòlid per un instant de temps s'han d'actualitzar les fraccions granulomètriques del material del fons de la llera en funció del material que ha sedimentat o que, per contra, s'ha erosionat.

Per obtenir el valor actualitzat de les fraccions granulomètriques es parteix de l'equació d'Exner per totes les fraccions granulomètriques (l'equació és per un node determinat):

$$(1 - \lambda_p) \left[f_{I,k} \frac{\partial(\eta - L_a)}{\partial t} + \frac{\partial(F_k - L_a)}{\partial t} \right] = - \frac{\partial q_{s,k}}{\partial x} \quad (24)$$

on,

$f_{I,k}$ és la fracció de material de la classe granulomètrica k que s'intercanvia entre el material superficial i el subsuperficial en funció de si s'erosiona o s'acumula material. En cada node i en cada instant de temps és diferent i es calcula:

$$f_{I,k} = \begin{cases} f_k & \frac{\partial \eta}{\partial t} < 0 \text{ (erosió)} \\ \beta F_k + (1 - \beta) p_k & \frac{\partial \eta}{\partial t} > 0 \text{ (acreció)} \end{cases} \quad (25)$$

on,

f_k és la fracció de material subsuperficial de la classe granulomètrica k .

β és un factor per determinar la proporció que es considera del material de la llera i quina del material subsuperficial. Els valors d'aquest factor estan compresos entre 0 i 1 (Hoey & Fergurson, 1994) (Toro-Escobar, et al., 1996). En aquest cas s'utilitza un valor de 0,5.

p_k és la fracció de sediment de fons de la classe granulomètrica k que s'obté dividint el cabal sòlid de la classe granulomètrica k entre el total.

Si es combinen les equacions (11) i (24) s'obté la següent equació:

$$(1 - \lambda_p) \left[L_a \frac{\partial F_k}{\partial t} + (F_k - f_{l,k}) \frac{\partial L_a}{\partial t} \right] = - \frac{\partial q_{s,k}}{\partial x} + f_{l,k} \frac{\partial q_{sT}}{\partial x} \quad (26)$$

Que si es discretitza per diferències finites, per un node i , i s'aïlla el valor de la fracció de material superficial en el següent instant de temps queda de la següent manera:

$$F_{i,k}^{t+1} = F_{i,k}^t - \frac{(F_{i,k}^t - f_{l,ik}^t)}{L_{a,i}^j} \frac{\partial L_{a,i}}{\partial t} \Delta t + \frac{\Delta t}{L_{a,i}^j (1 - \lambda_p)} \left(- \frac{\partial q_{s,k}^t}{\partial x} \Big|_i + f_{l,ik}^j \frac{\partial q_{sT}^t}{\partial x} \Big|_i \right) \quad (27)$$

La derivada temporal de la capa activa s'aproxima de la següent manera:

$$\frac{\partial L_{a,i}}{\partial t} \Delta t \cong L_{a,i}^t - L_{a,i}^{t-1} \quad (28)$$

És a dir que les fraccions del material que forma la capa activa, F , en cada node i en cada instant de temps es calculen a partir les corresponents a l'instant de temps previ modificant-se amb la granulometria del transport i la superficial o la del material subsuperficial en funció de si hi ha sedimentació o erosió respectivament. El resultat és explícit i depèn del canvi de la capa activa.

Existeix un cas particular de l'equació (28) i és el primer instant de temps ($t=1$), en aquest, el valor de la capa activa en l'instant previ es considera igual al d'aquell instant, o el que és el mateix, es considera que no hi ha canvis temporals a la capa activa.

4.1.3. Equilibri del fons (Balança de Lane)

A continuació es parla de l'equilibri del fons i com s'assoleix, és important per poder entendre els resultats obtinguts a l'apartat 5.

El perfil longitudinal d'un riu estarà en equilibri si les accions que hi actuen estan en equilibri. Lane (Lane, 1955) va proposar considerar que hi ha 4 variables que defineixen o intervenen a l'equilibri del perfil longitudinal del fons del riu: la mida del sediment (D), el pendent del fons (S), el cabal líquid (q , cabal unitari) i el cabal sòlid (q_s , cabal sòlid unitari que es mou pel fons). Aquestes variables les va col·locar a l'analogia de la balança que es presenta a la Figura 4-10. La variació d'aquestes variables fa moure la balança i determina si hi ha erosió o sedimentació al riu. Per tornar a aconseguir l'equilibri, alguna de les variables, o un conjunt d'elles, s'haurà de modificar de manera que l'agulla torni a estar vertical.

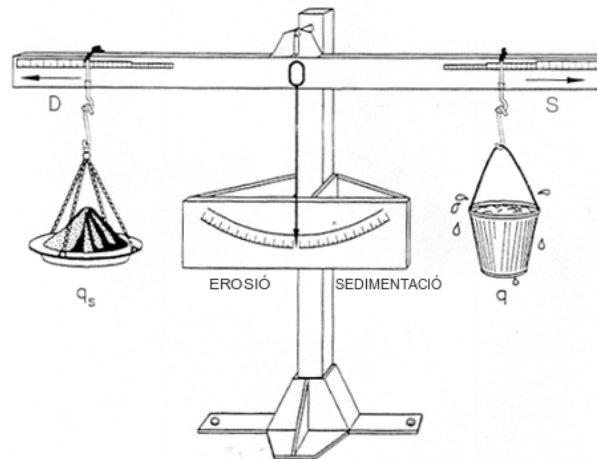


Figura 4-10: Analogia de la balança de Lane. Font: Modificat de (Chang, 1988).

Quan els cabals i la granulometria del sediment venen fixats exteriorment, només la variació del pendent permet tornar a l'equilibri.

Si els valors de les variables (q_s , q o S) fan que hi hagi erosió, el pendent del fons haurà de disminuir per tal de recuperar l'equilibri anterior. En canvi, si aquestes variables provoquen un desequilibri de sedimentació, el pendent S haurà d'augmentar per tornar a l'equilibri.

Si el diàmetre característic del sediment que compona la llera també pot variar amb el temps, com passa quan hi ha mesclures de material, el nou equilibri es restableix mitjançant una combinació de les variacions del pendent i del diàmetre.

En el cas de seccions compostes, el cabal unitari que passa per la llera principal també varia, ja que per un mateix cabal total en funció de la profunditat de la llera principal hi passarà més o menys cabal. Fem referència només a la llera principal perquè es considera que només hi ha transport de fons a la llera principal.

L'analogia de la balança és fàcilment aplicable quan hi ha paràmetres que es mantenen constants, quan tots són variables és més complex preveure l'evolució fins arribar a l'equilibri.

4.2. Hipòtesis i simplificacions

El model 1D morfodinàmic està basat en les equacions descrites a l'apartat 4.1 i que es resumeixen a continuació:

- Equacions del règim gradualment variat per resoldre el mòdul hidràulic (apartat 4.1.1)
- Equació de Meyer-Peter-Müller per calcular el cabal sòlid que circula per la llera en funció de les tensions que el flux d'aigua exerceix sobre el fons del riu.
- Equació d'Exner per la conservació de massa de sediment
- Relació d'Egiazaroff per simular el fenomen d'ocultament i exposició (presència de material no uniforme a la llera).

El model morfodinàmic es basa amb un seguit d'hipòtesis:

- Els canvis a la llera del canal es produeixen únicament a la vertical de la llera principal, és a dir, que el canal té una amplada fixa i no s'erosiona o s'acumula sediment a les planes d'inundació. Això és una simplificació respecte la realitat, ja que s'ha vist que el canal a part d'omplir-se de sediment s'ha eixamplat després de les avingudes del 2016 com es pot veure a la Figura 4-11.



Figura 4-11: Aspecte del canal auxiliar ple de graves i al fons s'aprecia l'erosió de la barra de la dreta del canal. Foto del 25/09//2017. Font: (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017)

- No es consideren els casos en que s'acumula més material del que cap a la llera principal.
- Flux gradualment variat, s'ha explicat a l'apartat 4.1.1.
- El transport de sediment de fons s'obté a partir de la capacitat de transport.
- Representació unidimensional del flux i dels processos de transport.
- El canal se suposa recte, sense curvatura i amb geometria constant.
- Se suposa que sempre està en règim subcrític, de manera que es necessiten dues condicions de contorn: aigües avall (cota d'aigua) i aigües amunt (cabal d'entrada).
- El número de Froude es calcula com un únic valor a tota la secció, com s'ha pogut observar a la definició del número de Froude. Aquesta simplificació, com s'ha comprovat en estudis, dona un valor més elevat del real, tant per les planes com per la llera principal (Lee, et al., 2002).
- Un únic pendent motriu per tota la secció.
- La capa activa es defineix com dues vegades el D_{90} de la granulometria de la superfície de la llera.
- No es guarda l'estratigrafia del material sedimentat, de manera que la granulometria del material subsuperficial és sempre constant en el temps i igual a la inicial.

4.2.1. Geometria

El tram d'estudi s'ha discretitzat en diferents nodes, la geometria dels quals és simètrica amb una llera principal d'ample B_{II} i profunditat h_{II} i dues planes d'inundació d'un ample B_{pl} cadascuna i amb un pendent transversal de les planes s_{pl} . La coordenada vertical de la secció està definida per la cota del fons de la llera principal (η_b) que també permet definir el pendent longitudinal entre els nodes.

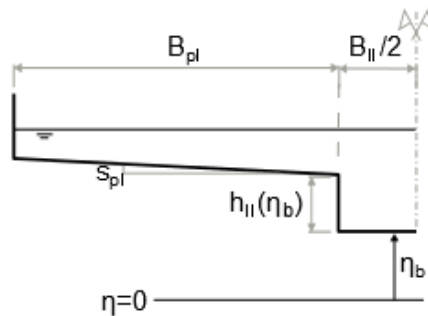


Figura 4-12: Secció tipus del model amb les diferents variables que la defineixen. Font: elaboració pròpia.

Com s'ha citat anteriorment, de la geometria del riu només pot canviar la cota de fons de la llera principal en cada secció i per tant, indirectament el pendent entre seccions i la profunditat de la llera principal, ja que la cota de les planes es manté constant.

4.2.2. Condicions inicials

Com a condicions inicials entenem aquelles que s'imposen al primer instant de temps del model i que serveix per obtenir els valors en passos de temps successius.

Aquestes condicions són la geometria inicial explicada a l'apartat anterior (secció transversal i pendent inicial de la llera) i la granulometria de la llera, tant superficial com subsuperficial.

Per tractar les dades granulomètriques s'han convertit a freqüències i s'han definit diferents classes (apartat 4.1.2).

4.2.3. Condicions de contorn

Les condicions de contorn són aquelles necessàries pel càlcul. Tal com s'ha descrit en l'apartat 4.1 es necessiten unes condicions de contorn aigües amunt i una condició de contorn aigües avall per resoldre el sistema format per les equacions del GVF i les del mòdul morfodinàmic.

Les condicions de contorn a l'extrem superior són el cabal líquid i sòlid d'entrada amb la seva granulometria corresponent. Mentre que a l'extrem inferior del domini la condició de contorn és la cota d'aigua; tot i que s'introdueixi com a calat, internament al càlcul es transforma a cota d'aigua.

Tant la condició de contorn de cabal sòlid com la del calat es permeten multiplicar per un coeficient per calibrar els resultats.

4.3.Comprovacions

Abans de simular el cas d'estudi s'han fet un seguit de comprovacions per assegurar el bon funcionament del model en situacions més simples on es coneix el resultat esperat o per veure quin és el comportament en situacions més simples que les del cas d'estudi però que no se'n coneix la resposta, per tal de poder explicar el resultat en el cas d'estudi.

4.3.1. Llera rectangular

Per comprovar el bon funcionament dels mòduls hidràulic i de l'actualització de les cotes de fons, s'han realitzat un seguit de simulacions amb secció rectangular mantenint les condicions de contorn constants al llarg del temps i amb el material de la llera i el del cabal sòlid d'entrada definits amb un sol diàmetre. Això s'ha fet així per poder veure el funcionament de la hidràulica i de les cotes de fons independentment de la granulometria. La simulació base (cas 1.0) es fa amb règim uniforme (imposant com a condició de contorn aigües avall el calat normal) i amb el cabal sòlid d'entrada igual a la capacitat al primer node en el primer instant de temps. S'han realitzat 4 simulacions més on la diferencia amb el cas 1.0 és l'augment o la disminució del cabal sòlid respecte del de capacitat o l'augment o la disminució de la condició de contorn aigües avall (cota d'aigua) respecte el calat normal.

A continuació es detallen les característiques principals de les diferents simulacions en llera rectangular:

Taula 4-2: Característiques de les simulacions en llera rectangular

Paràmetres	Cas 1.0	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 1.3	Cas 1.4
Secció	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Rectangular	Rectangular
Pendent inicial	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Ample de la llera principal (m)	12	12	12	12	12
Longitud del tram (m)	400	400	400	400	400
Nodes	21	21	21	21	21

Paràmetres	Cas 1.0	Cas 1.1	Cas 1.2	Cas 1.3	Cas 1.4
Cabal líquid (m³/s)	50	50	50	50	50
Condicció de contorn aigües avall	calat normal (t=0s)	0.8 x calat normal (t=0s)	1,1 x calat normal (t=0s)	calat normal (t=0s)	calat normal (t=0s)
Cabal sòlid d'alimentació (m³/s)	0,0016	0,0016	0,0016	0,0013	0,0017
D ₅₀ inicial de la llera (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
D ₅₀ inicial del cabal sòlid d'alimentació (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
a_u	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

4.3.2. Llera composta

S'ha realitzat el mateix anàlisi que a l'apartat anterior (apartat 4.3.1) però amb la llera composta.

Respecte els càlculs anteriors, cal destacar que totes les simulacions es realitzen de manera que el calat normal es produeix ocupant tant les planes d'inundació com la llera principal, és a dir que aquest és major a la profunditat de la llera.

A continuació es detallen les característiques principals de les diferents simulacions en llera composta:

Taula 4-3: Característiques de les simulacions en llera composta

Paràmetres	Cas 2.0	Cas 2.1	Cas 2.2	Cas 2.3	Cas 2.4
Secció	Composta	Composta	Composta	Composta	Composta
Pendent inicial	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Ample de la llera principal (m)	12	12	12	12	12
Profunditat llera principal (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Ample total de les planes d'inundació (m)	50	50	50	50	50
Pendent de les planes d'inundació	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Longitud del tram (m)	400	400	400	400	400
Nodes	21	21	21	21	21

Paràmetres	Cas 2.0	Cas 2.1	Cas 2.2	Cas 2.3	Cas 2.4
Cabal líquid (m ³ /s)	150	150	150	150	150
Condió de contorn aigües avall	calat normal	0,95 x calat normal	1,01 x calat normal	calat normal	calat normal
Cabal sòlid d'alimentació (m ³ /s)	0,011	0,011	0,011	0,009	0,012
D ₅₀ inicial de la llera (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
D ₅₀ inicial del cabal sòlid d'alimentació (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7	32,7
a_u	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52

Les variacions de les condicions de contorn de calat i cabal sòlid dels diferents casos són tant petites respecte el cas 2.0 ja que sinó s'arribava a situacions amb el número de Froude major a 0,7 o s'omplia la llera completament de sediment.

Cap de les dues situacions està ben resolta al model, ja que quan el número de Froude és majora 0,7 el model no calcula el calat sinó que imposa el calat crític. Per altra banda no es contempla que la llera principal s'ompli completament (veure l'apartat 4.2). Si es considerés un pendent inferior i una llera principal més ampla, no es produirien tant fàcilment aquestes situacions, però la geometria s'ha escollit perquè fos el més similar possible al cas d'estudi.

Una altra situació crítica és quan la cota de la làmina d'aigua passa d'estar a dins de la llera principal a les planes d'inundació o a l'invers degut als canvis que provoca al perímetre mullat i a altres variables que afecten al càlcul. Per intentar suavitzar aquesta transició s'ha definit el pendent transversal o pendent de les planes d'inundació.

4.3.3. Sensibilitat a la dispersió granulomètrica

Per estudiar l'efecte de la dispersió granulomètrica en el perfil inicial i en el d'equilibri s'han realitzat càlculs per diferents casos considerant distribucions granulomètriques amb el mateix diàmetre D₅₀ però amb una desviació geomètrica variable de 1 a 1,74. Per tenir un ordre de magnitud la desviació geomètrica del material superficial del canal auxiliar és de 1,78 (veure l'apartat 3.2.2). La Figura4-13 mostra les diferents distribucions.

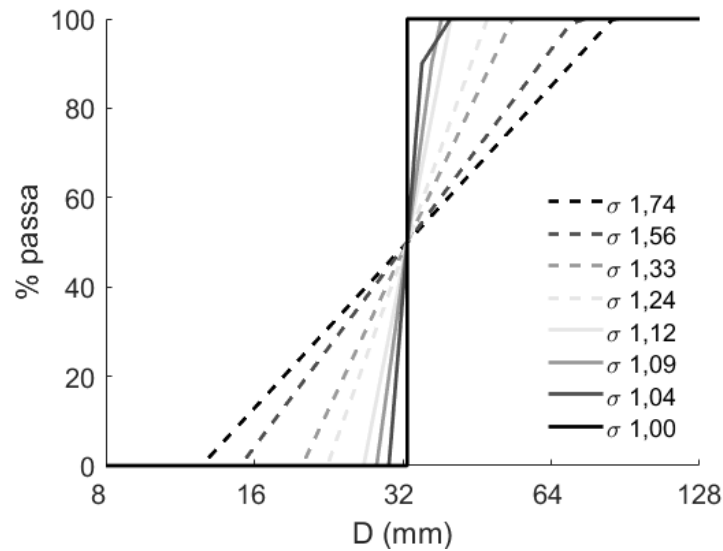


Figura 4-13: Distribucions granulomètriques definides per la desviació geomètrica (16).

La Taula 4-4 resumeix les característiques dels diferents casos calculats per veure quin efecte té la dispersió granulomètrica en els resultats.

Taula 4-4: Característiques dels 4 casos base per a la dispersió granulomètrica

Paràmetres	Cas 3.1	Cas 3.2	Cas 3.3	Cas 3.4
Secció	Composta	Composta	Rectangular	Rectangular
Pendent inicial	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Ample de la llera principal (m)	12	12	12	12
Profunditat llera principal (m)	1.5	1.5	-	-
Ample total de les planes d'inundació (m)	50	50	-	-
Pendent de les planes d'inundació	0.02	0.02	-	-
Longitud del tram (m)	400	400	400	400
Nodes	21	21	21	21
Cabal líquid (m³/s)	100	100	50	50
Condicció de contorn aigües avall	0,8 x calat normal (M2)	0,8 x calat normal (M2)	0,8 x calat normal (M2)	0,8 x calat normal (M2)
Cabal sòlid d'alimentació (m³/s)	0,002 (Valor inferior al de capacitat de la llera en el 1r	0,008 (Valor inferior al de capacitat de l'últim node i superior al del primer node en	0,001 (Valor inferior al de capacitat del primer node en	0,002 (Valor inferior al de capacitat de l'últim node i superior al del

Paràmetres	Cas 3.1	Cas 3.2	Cas 3.3	Cas 3.4
	instant de temps)	el 1r instant de temps)	el 1r instant de temps)	primer node en el 1r instant de temps)
D ₅₀ inicial de la llera (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7
D ₅₀ inicial del cabal sòlid d'alimentació (mm)	32,7	32,7	32,7	32,7
a_u	0,51	0,51	0,6	0,6

A la Taula4-5 apareixen quines granulometries s'han utilitzat en cada cas, ja que les simulacions amb una desviació geomètrica major no s'han pogut calcular amb tots els casos degut a les simplificacions del model.

A l'augmentar la desviació geomètrica el perfil d'equilibri requereix pendents més elevats, el que acaba produint calats baixos i per tant números de Froude elevats. Aquesta situació s'ha simplificat com s'ha explicat a l'apartat 4.2. Pel cas de llera composta el càlcul està limitat perquè s'acumula més material del que cap a la llera principal i això porta a una situació no considerada en aquest model, com s'ha explicat a l'apartat 4.2. A l'apartat 5.3 s'analitzarà amb més detall la tendència dels diferents resultats.

Taula4-5: Simulacions realitzades amb els diferents casos

Sigma	Cas 3.1	Cas 3.2	Cas 3.3	Cas 3.4
1	Sí	Sí	Sí	Sí
1,04	Sí	Sí	Sí	Sí
1,09	Sí	Sí	Sí	Sí
1,12	Sí	Sí	Sí	Sí
1,24	Sí	Sí	Sí	Sí
1,33	Sí	Sí	Sí	Sí
1,56	-	Sí	Sí	Sí
1,74	-	Sí	-	Sí

Totes les simulacions s'han realitzat amb les condicions de contorn constants. La condició de contorn d'aigües avall s'imposa com a cota fixa. La cota fixada és lleugerament diferent en funció de la granulometria, ja que depèn del coeficient de Manning i aquest al seu torn del D₉₀ de la granulometria (7). Les diferències són de l'ordre de centímetres (3 cm) -, que comparades amb les magnituds mètriques dels calats se suposen negligibles.

En els primers instants de temps la condició de contorn imposa un número de Froude major a 0,7, això implica que el calat es calculi amb el calat crític als nodes més propers a la condició d'aigües avall. A la situació d'equilibri el número de Froude ja és inferior a 0,7, el canal troba un equilibri en règim lent.

Amb les condicions inicials dels casos 3.1 i 3.2 tant el calat crític com el calat normal tenen una única solució com es pot veure a la Figura 4-14 i a la Figura 4-15. Els casos 3.3 i 3.4 on la llera és rectangular els dos calats són unívocs per definició (veure l'apartat 4.1.1).

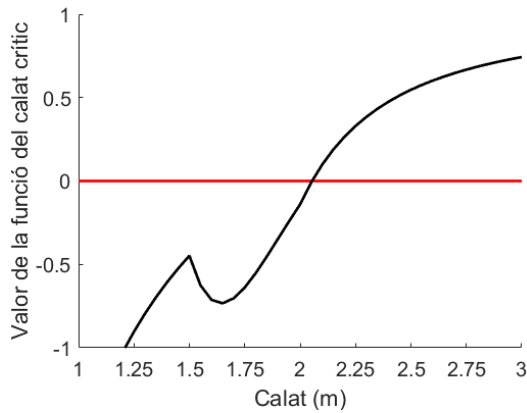


Figura 4-14: Funció del calat crític per les condicions inicials dels casos 3.1 i 3.2.

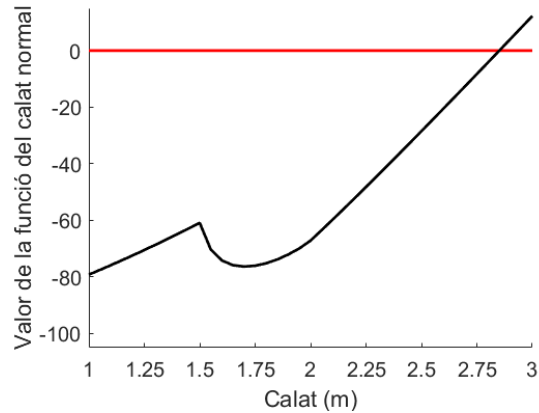


Figura 4-15: Funció del calat normal per les condicions inicials dels casos 3.1 i 3.2.

La funció del calat normal en aquest cas només s'aplica al primer instant de temps per obtenir la condició de contorn i és unívoca, és a dir que només hi ha un resultat possible com es veu a la Figura 4-15. Tot i que no aplica en aquest apartat, analitzant la funció es detecta que la reducció del coeficient de Manning i/o l'augment del pendent del fons i/o de la profunditat de la llera fan pujar la funció de manera que pot arribar a tenir més d'una solució.

Per altra banda, la funció del calat crític es veu afectada per la variació de la profunditat de la llera. Quan major sigui la profunditat la funció es desplaçarà cap amunt, de manera que hi haurà moments on hi haurà més d'una possible solució. L'interval de profunditats de la llera durant el qual hi ha més d'una solució és aproximadament de 1,9 m a 2,3 m. Als casos 3.1 i 3.2 la profunditat de la llera inicial és de 1,5m, és a dir que si es produeixen erosions de 40 a 80 cm i s'ha de calcular el calat crític, aquest tindrà més d'una solució. A l'apartat de resultats es tindrà en compte aquesta observació.

4.4.Cas d'estudi

A continuació es descriu com s'ha realitzat el cas d'estudi detallant la geometria utilitzada i les condicions de contorn i inicials imposades, així com la descripció de com s'han obtingut.

4.4.1. Geometria

El tram d'estudi s'ha discretitzat en 21 nodes, la geometria dels quals s'ha considerat simètrica respecte l'eix longitudinal del canal. La secció està formada per una llera principal de 12 m d'ample (B_{II}) i 1,5 m de profunditat inicial (h_{II}) i

dues planes d'inundació de 34 m d'ample cadascuna (B_{pl}) i amb un pendent transversal de les planes d'inundació de 0,02 (s_{pl}).

Com el tram d'estudi té una longitud de 400m, la distància entre nodes de càlcul és de 20m.

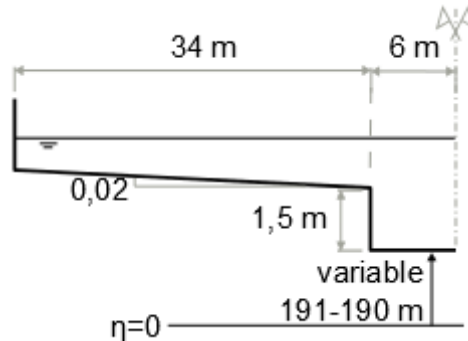


Figura 4-16: Secció tipus inicial del cas d'estudi. Al llarg del temps el valor de 1,5m (h_{II}) i les cotes del fons aniran variant. Font: elaboració pròpia.

El pendent (S) entre nodes inicialment és de 0,0025 i la longitud del tram d'estudi és de 400 metres, que es correspon amb la longitud total del canal auxiliar excavat.

La geometria de la llera auxiliar s'ha simplificat respecte la original. El canal excavat era un canal trapezoïdal de 10 metres de base inferior i amb uns talussos laterals de 3H:2V, el que resultava amb una amplada d'uns 14 metres a la part superior. Per simplificar la geometria de la llera principal s'ha suposat rectangular amb una amplada de 12m, de manera que l'àrea de la llera sigui la mateixa.

Realment la profunditat del canal és variable, des de 2m a inferior a un metre. La profunditat mitjana al llarg dels 400m és d'aproximadament 1,5m, és per això que per simplificar s'ha suposat que els 400 metres de canal auxiliar tenen 1,5 metres de profunditat de la llera.

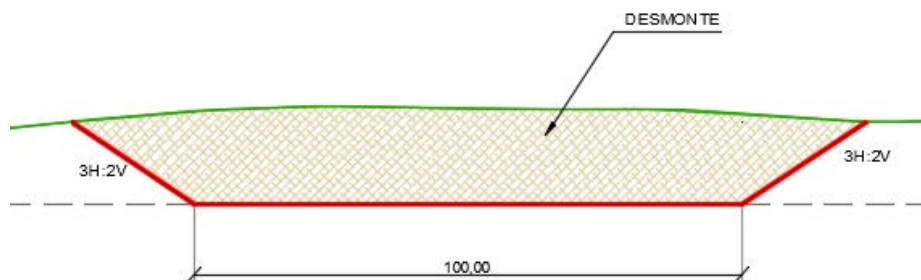


Figura 4-17: Secció tipus del canal excavat, unitats en decímetres. Font: Plànols facilitats per l'Ajuntament de Zaragoza

Una altra simplificació és l'amplada constant de les planes d'inundació, s'ha suposat que al llarg de tota la longitud del riu la seva amplada és constant i igual a 34 metres, és un valor mitjà de la seva amplada, ja que aquesta va variant al llarg de la longitud del canal auxiliar. Per determinar l'amplada de les planes del marge dret del canal s'ha suposat que el punt més alt de la illa entre els dos

braços és el límit entre la plana d'inundació del braç del canal i del del riu. Pel que fa al marge esquerre, s'ha considerat l'amplada de la plana natural.

La secció no és simètrica, però per simplicitat s'ha considerat així. Això afecta en el càlcul de l'àrea d'aigua a les planes d'inundació. Aquesta afectació és petita ja que el pendent transversal de les planes ho és i les diferències d'àrees obtingudes respecte el cas amb planes no simètriques són menyspreables quan es comparen amb les aproximacions que s'han fet per obtenir una amplada de la llera uniforme al llarg del tram d'estudi. Si el pendent transversal fos zero, no hi hauria diferència entre els resultats obtinguts amb una secció simètrica i una asimètrica. No es considera zero per evitar inestabilitats en el model, degut als grans canvis produïts en les àrees i perímetres mullats quan l'aigua passa d'ocupar només la llera principal a ocupar també les planes d'inundació i viceversa.

Una altra simplificació realitzada és la de considerar que les planes d'inundació tenen un pendent transversal constant. Realment al marge esquerra del canal auxiliar hi ha una antiga llera del riu Gállego abandonada, per simplificació no es considera.

Com es pot veure a la Figura 3-13 el tram d'estudi no és recte, però això no s'ha tingut en compte a la simulació i s'ha suposat recte com s'ha dit a l'apartat 4.2..

4.4.2. Condicions inicials

Com s'ha especificat a l'apartat 4.2.2, les condicions inicials són la geometria, ja especificada a l'apartat 4.4.1, i la granulometria de la llera auxiliar en el primer instant de temps.

No es tenen dades de la granulometria del material amb el que es va realitzar el canal auxiliar. Només es tenen les mostres granulomètriques de la Figura 3-13 preses el 2017 després de les crescudes del 2016. Les mostres superficials localitzades al llarg de la traça del canal auxiliar són representatives del material sedimentat durant les crescudes del 2016, però no del material que forma el canal.

És per això que la granulometria inicial del canal s'ha suposat que és la mitjana de les granulometries subsuperficials de la Figura 3-13 i la Figura 3-14. Com el canal auxiliar s'ha excavat i s'ha remogut tot el material, se suposa que el material superficial i subsuperficial del cas d'estudi tenen la mateixa granulometria inicialment.

La taula següent resumeix la granulometria superficial i subsuperficial considerada al model en el primer instant de temps:

Taula 4-6: Granulometria superficial i subsuperficial inicial

Diàmetre (mm)	% que passa
256	100,0
128	99,5
64	85,8
32	62,0
16	34,0
8	17,5
4	9,6
2	6,5
1	3,7
0,5	1,6
0,25	0,6
0,125	0,0

Cal destacar que es considera constant la granulometria subsuperficial, com s'ha dit a l'apartat 4.2.

4.4.3. Condicions de contorn

Com s'ha especificat a l'apartat 4.2.3, les condicions de contorn són bàsicament 3. Dues a l'extrem superior del domini (el cabal líquid d'entrada i el cabal sòlid d'entrada amb la granulometria corresponent) i una a l'extrem inferior del domini (la cota d'aigua).

Per obtenir el cabal líquid d'entrada s'ha hagut de determinar quina quantitat passa pel riu Gállego i quina pel canal auxiliar. Per tal de determinar aquesta divisió de cabals s'han realitzat diferents càlculs amb HEC-RAS, cadascun amb un cabal diferent dels hidrogrames de les crescudes del 2016 per veure quina quantitat de cabal passa per cada braç de la bifurcació.

A la següent figura apareixen els hidrogrames seguits de les dues crescudes del febrer i del novembre del 2016, conjuntament amb els cabals corresponents del canal auxiliar i del riu. Aquesta distribució de cabals s'ha obtingut considerant que no hi ha acumulació de sediment al canal auxiliar.

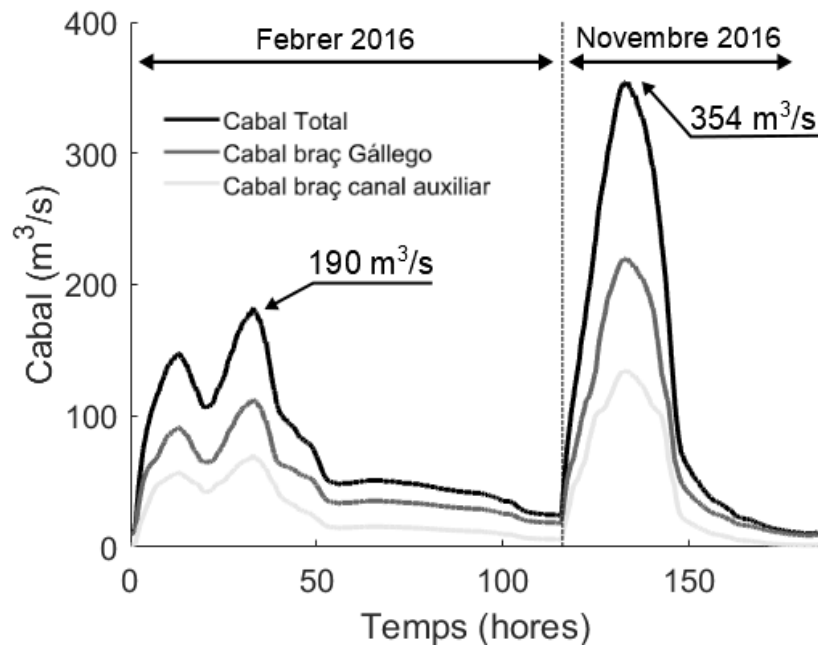


Figura 4-18: Hidrograma amb el cabal total i el que passa per cada braç durant les dues crescudes considerant que no hi ha sediment al canal auxiliar.

El model calculat amb HEC-RAS està basat amb el model del 2004 citat a l'apartat 3.2.3 però amb modificacions al tram d'estudi per incloure el canal auxiliar i les variacions existents en aquella zona des del 2004 fins al 2016. Només s'han utilitzat les seccions que apareixen a l'esquerra de la Figura 3-11 i s'han modificat les seccions contingudes al tram d'estudi a partir de seccions obtingudes dels MDT de l'octubre de 2015 per incloure el canal auxiliar i de les seccions realitzades per l'investigador Pedro Duarte per actualitzar la geometria del riu.

A l'Annex C es detallen els càlculs realitzats per obtenir la divisió de cabals entre els dos braços de la bifurcació considerant la transferència de cabals i l'efecte de la sedimentació. Els resultats obtinguts serviran, entre d'altres, per la condició de contorn aigües amunt del cabal líquid.

A partir dels càlculs anteriors també s'ha obtingut la condició de contorn necessària aigües avall. Aquesta és la cota de l'aigua a l'última secció del tram del canal auxiliar. S'ha comprovat que aquest valor només depèn del cabal d'entrada i que no depèn de la condició de contorn que es posa aigües avall del model de l'HEC-RAS. És a dir, que el model del 2004 té una extensió suficient com perquè la seva pròpia condició de contorn (calat del riu Gállego a la desembocadura del riu Ebre, situada a un quilòmetre i mig aproximadament del final del tram d'estudi) no afecti al tram d'estudi. Com que el model d'HEC-RAS no considera l'erosió del fons, s'imposa aquesta condició de contorn com a cota i no com a calat al model d'aquest treball.

Per obtenir el cabal sòlid que entra al canal auxiliar s'ha utilitzat la relació nodal presentada al document (Kleinhans, et al., 2008) que és una expressió algebraica per obtenir el repartiment de cabals entre dos braços. Per dur-la a terme es necessiten les següents variables: distribució de cabals líquids entre

els dos braços, cabal sòlid total, velocitat del flux en la direcció del riu i transversal a prop del llit (mesura de velocitats de la Figura 3-13), la mitjana de la variació transversal de la cota del fons al tram aigües amunt de la bifurcació (seccions de la Figura 3-13) i l'ample dels 3 trams (els dos braços de la bifurcació i aigües amunt d'aquesta). A l'annex D es presenten les equacions i a l'apartat 5.4.1 s'analitzen les condicions de contorn obtingudes.

La distribució de cabals líquids entre els dos braços s'ha obtingut mitjançant el model d'HEC-RAS com s'ha explicat en aquest mateix apartat i a l'Annex C.

El cabal sòlid total que transporta el riu Gállego s'ha obtingut a partir de l'equació de Meyer-Peter i Müller adaptada per mescles (19) i considerant l'efecte d'exposició i ocultament (20). Per calcular les tensions de fons s'han utilitzat els calats obtinguts aigües amunt de la bifurcació en els diferents càlculs realitzats amb HEC-RAS (els calats depenen del cabal líquid total i de l'acumulació de sediment al canal auxiliar). Es disposa de mesures de camp de la fase de descens d'una crescuda (apartat 3.2.2) inferior a la de les del 2016, degut a les característiques de les dades no s'han utilitzat. Al document (Ferrer Boix, et al., 2018) es fa un anàlisi de la relació d'aquestes dades amb l'equació de Meyer-Peter i Müller. La conclusió és que l'equació de Meyer-Peter i Müller sobreestima els resultats. A l'apartat 5.4.2 es compararan les mesures del camp amb les obtingudes pel model en un cabal similar.

Pel que fa a les dades disponibles de velocitat del flux a prop del llit es corresponen amb uns valors baixos de cabal, de l'ordre de 4,5 m³/s. A falta de més dades s'utilitza la relació obtinguda amb les dades de camp. La relació entre la velocitat mitjana en la direcció del corrent i en la direcció transversal al corrent és de 0,1, és a dir, que el flux transversal és 0,1 vegades el flux en la direcció del riu. El sentit del flux transversal és cap al canal auxiliar.

Al document (Ferrer Boix, et al., 2018) s'analitza l'efecte d'aquesta relació amb l'augment del cabal líquid i com varia la relació de cabals sòlids amb la variació de la relació de les velocitats mitjanes en la direcció del flux i transversalment a prop del llit. S'observa que com major sigui el cabal líquid menys sediment passa pel canal auxiliar respecte el que passa pel braç del riu. Aquesta diferència del ràtio de cabals sòlids en funció dels cabals líquids s'accentua com major sigui la relació entre les velocitats mitjanes en la direcció del flux i transversalment a prop del fons, és a dir, que com major sigui el flux transversal respecte al de la direcció del riu, major serà la diferència del ràtio de cabals sòlids per dos cabals líquids diferents. Per altra banda, com major sigui la relació del flux de velocitats, major és el ràtio de cabals sòlids, de manera que augmenta el cabal sòlid del canal auxiliar respecte al del braç del riu.

Referent a la variació transversal de la cota del fons al tram aigües amunt de la bifurcació s'ha obtingut de la secció realitzada al prendre les mesures del flux de velocitats. El pendent transversal s'ha vist que és zero en aquella secció, de manera que no tindrà efecte en el càlcul de la distribució dels cabals sòlids.

L'ample dels trams s'ha obtingut de les seccions existents en el tram d'estudi. L'ample aigües amunt és de 30m, el del braç del Gállego és de 25m i el del canal auxiliar és de 12m, com ja s'ha dit anteriorment.

Amb tots aquest càlculs ja s'han obtingut les condicions de contorn pel model.

En funció del material acumulat al canal auxiliar, el model escollirà unes condicions de contorn o unes altres. Per a fer-ho, es calcularà el material acumulat i se'n farà la mitjana al llarg de tot el canal auxiliar. Aquest valor es compararà amb la mitjana de material acumulat corresponent a les diferents falques considerades i es realitzaran les corresponents interpolacions lineals per obtenir les condicions de contorn pel material existent acumulat. El model únicament interpola en funció de la falca de sediment, ja que com a dades d'entrada ja té les diferents condicions amb la variació temporal deguda a l'hidrograma.

5. Resultats

A continuació es mostren els resultats obtinguts amb les simulacions descrites als apartats 4.3 i 4.4.

5.1.Llera rectangular

A continuació s'analitzen els resultats obtinguts per les diferents simulacions amb llera rectangular descrites a l'apartat 4.3.1. Es mostren alguns resultats per poder explicar millor l'evolució fins arribar a l'equilibri.

5.1.1.Cas 1.0

El cas 1.0, com s'ha dit a l'apartat 4.3.1, és aquell on les condicions de contorn que s'imposen són el cabal sòlid de capacitat aigües amunt i el calat normal aigües avall. És a dir, que està en règim uniforme. Com ja està en equilibri perquè li entra tant sediment de fons com el que és capaç de transportar a tots els nodes amb la geometria i la condició de contorn d'aigües avall imposada, s'espera que no hi hagi canvis de la llera ni en pendent ni en cotes.

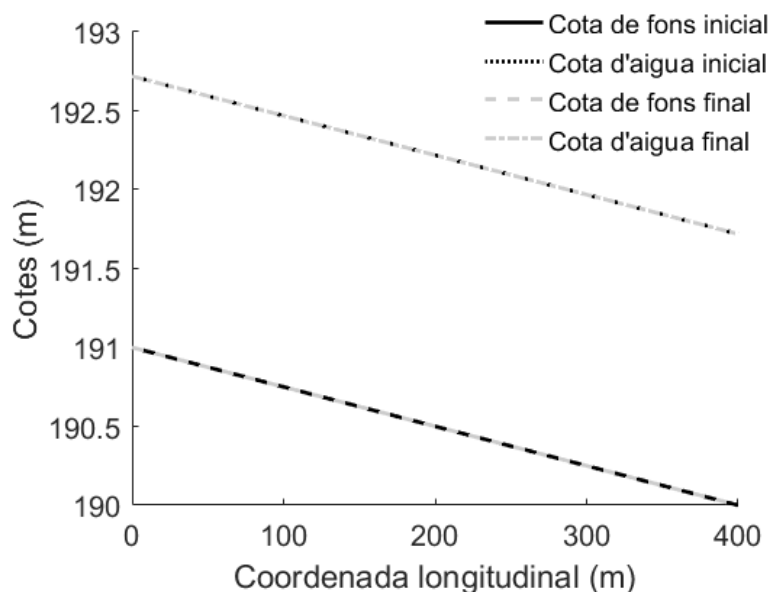


Figura 5-1: Perfil longitudinal del cas 1.0 en llera rectangular. En línia contínua negra la cota del fons inicial, en discontinua gris la cota de fons final, en línia puntejada negra la cota de la làmina d'aigua inicial i en línia de ratlla i punts de color grisa la cota de la làmina d'aigua final.

Com es pot veure a la Figura 5-1 les línies grises se superposen a les negres, és a dir que la situació al cap de més d'un dia és la mateixa que hi havia inicialment. A la Figura 5-2 es pot veure l'evolució temporal dels diferents nodes. Tots els nodes mantenen la cota que tenen inicialment. Per tant, no hi ha canvis, tot està en règim uniforme, és a dir en equilibri. La làmina d'aigua i la llera són dues línies

paral·leles, ja que no hi ha variacions espacials. La igualtat del pendent de la superfície lliure amb el pendent de la llera i el pendent motriu és la conseqüència del règim uniforme.

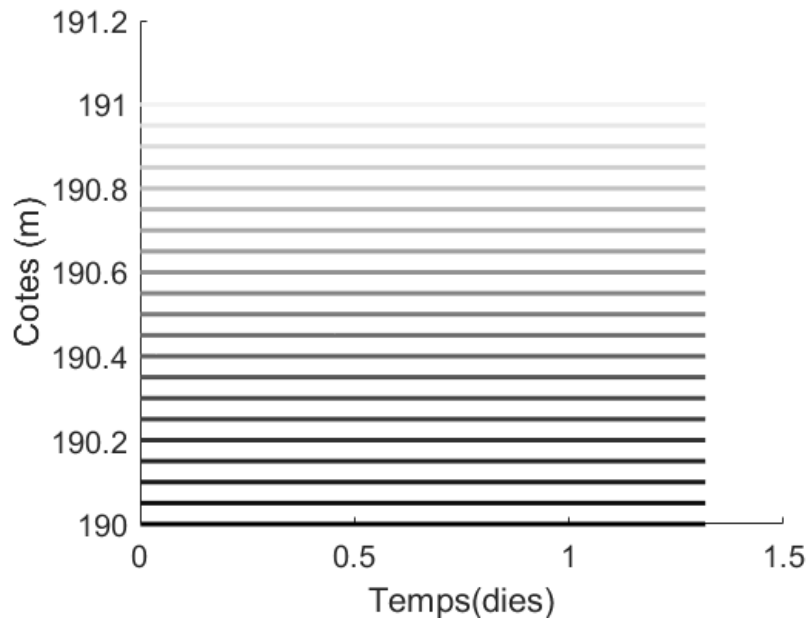


Figura 5-2: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 1.0 en llera rectangular. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com s'ha comprovat, la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular una llera rectangular en règim uniforme i material uniforme.

5.1.2. Cas 1.1

El cas 1.1, com s'ha dit a l'apartat 4.3.1, té com a cabal sòlid d'entrada el mateix que el cas 1.0, és a dir que és el que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té un calat inferior al calat normal.

Com el calat a l'últim node és inferior al del calat normal i aigües amunt tendeix al calat normal, tenim una corba de rabeig tipus M2, el pendent motriu ha augmentat respecte el del cas 1.0, que és la situació d'equilibri. Això dóna lloc a un augment de la capacitat de transport i per tant provocarà erosió. El pendent del fons no s'espera que es vegi afectat ja que no s'ha variat cap de les variables de la balança de Lane (veure l'apartat 4.1.3 i la Figura 4-10).

A continuació es mostren les mateixes figures que en l'apartat anterior, però amb els resultats del cas 1.1.

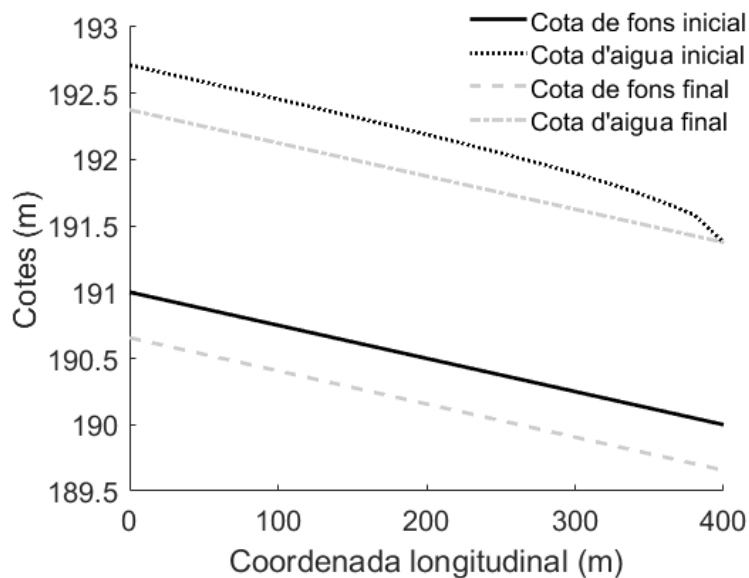


Figura 5-3: Perfil longitudinal del cas 1.1 en llera rectangular. Les línies contínua i discontinua són les cotes del fons de la llera principal i amb línies puntejada i de punts són les cotes de la làmina d'aigua. Situació inicial (negre) i final (gris).

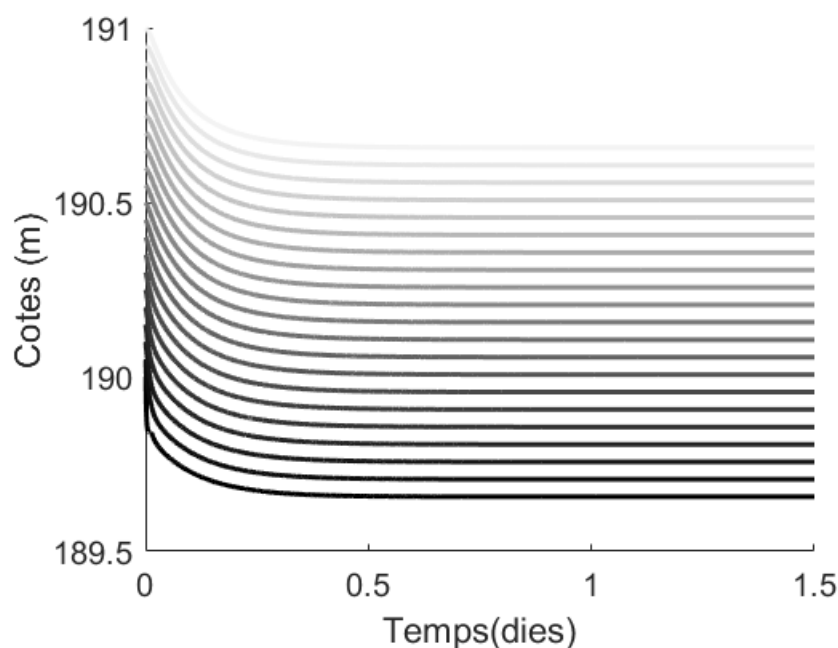


Figura 5-4: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 1.1 en llera rectangular. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Tal com s'esperava es manté el pendent, però hi ha erosió forçada per la condició de contorn d'aigües avall, que és 0,8 vegades el calat normal. A la Figura 5-3 es pot veure clarament que la llera al cap de quasi un dia i mig és una còpia de la inicial, però traslladada quasi mig metre més avall. La làmina d'aigua assoleix a tots els nodes el calat normal. Com es pot veure la cota de la làmina d'aigua a l'últim node es manté constant, ja que està imposada, i són els valors a la resta

de nodes que varien fins que esdevenen una línia paral·lela a la de les cotes del fons.

A la Figura 5-4 es pot observar l'evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes. S'aprecia com els nodes de més aigües avall disminueixen de cota més ràpidament. Per exemple, l'últim node ha disminuït la seva cota inicial de 190m quasi instantàniament, mentre que el primer node tarda més a disminuir de cota, com es pot veure amb el pendent de la corba els primers instants de temps. Aquest fet és degut a que els últims nodes estan forçats per la condició de contorn d'aigües avall, i que de mica en mica la resta de nodes van disminuint la cota fins arribar a l'equilibri, amb el mateix pendent que tenien inicialment.

Com es pot veure la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular l'evolució fins a l'equilibri d'una llera rectangular on el calat aigües avall s'ha reduït respecte el normal (corba M2).

5.1.3. Cas 1.2

El cas 1.2, com s'ha dit a l'apartat 4.3.1, té com a cabal sòlid d'entrada el mateix que el cas 1.0, és a dir que és el que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té un calat superior al calat normal.

La situació del cas 1.2 és la inversa al cas 1.1, és a dir que s'espera el mateix comportament però de signe oposat, si abans s'erosionava la llera ara s'acumularà material.

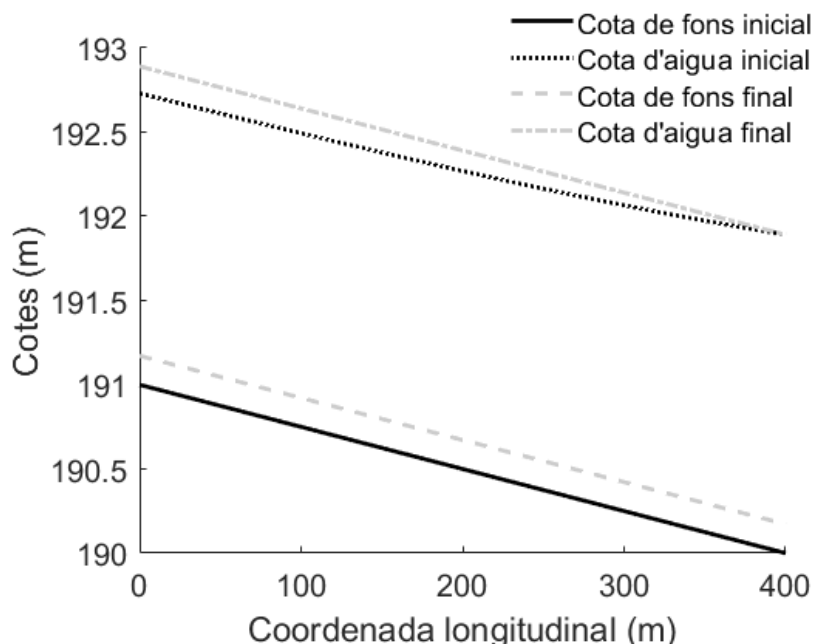


Figura 5-5: Perfil longitudinal del cas 1.2 en llera rectangular. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

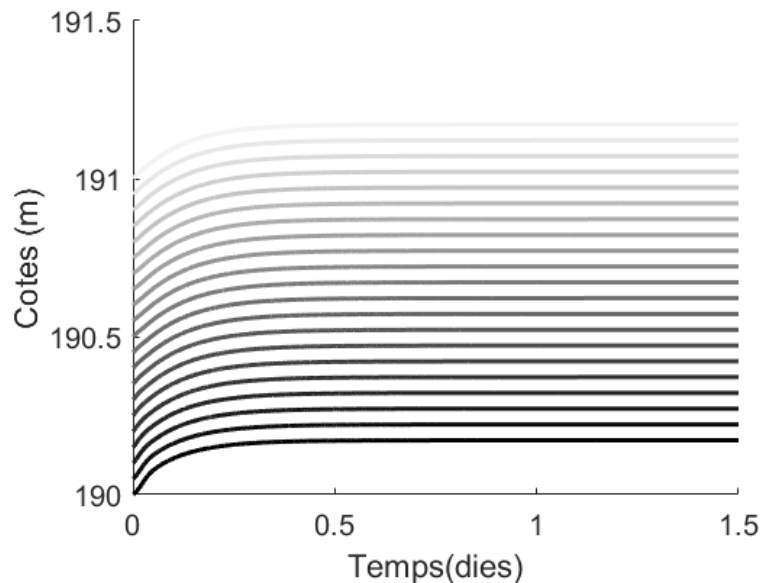


Figura 5-6: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 1.2 en llera rectangular. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Tal com s'esperava es manté el pendent, però hi ha acumulació de sediment, forçada per la condició de contorn d'aigües avall, que és 1,1 vegades el calat normal. A la Figura 5-5 es pot veure clarament que la llera al cap de quasi un dia i mig és una còpia de la inicial, però traslladada uns 20 cm cap amunt. La làmina d'aigua assoleix a tots els nodes el calat normal, com es pot veure la cota de la làmina d'aigua a l'últim node es manté constant, ja que està imposada, i són els valors a la resta de nodes que varien fins que esdevenen una línia paral·lela a la de les cotes del fons.

A la Figura 5-6 es pot observar l'evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes. S'aprecia com els nodes de més aigües avall augmenten de cota més ràpidament, ja que estan forçats per la condició de contorn d'aigües avall, i que de mica en mica la resta de nodes van augmentant la cota fins arribar a l'equilibri, amb el mateix pendent que tenien inicialment.

Com es pot veure la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular l'evolució fins a l'equilibri d'una llera rectangular on el calat aigües avallha augmentat respecte el normal, existència de règim lent (corba M1).

5.1.4. Cas 1.3

El cas 1.3, com s'ha dit a l'apartat 4.3.1, té com a cabal sòlid d'entrada un valor inferior al del cas 1.0, és a dir que és inferior al que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té el calat normal.

Com el calat a l'últim node és el calat normal, inicialment a tots els nodes hi ha el calat normal. Però com està entrant menys sediment del que pot transportat, segons la balança de Lane (veure l'apartat 4.1.3 i la Figura 4-10), es produirà una disminució del pendent per reduir la capacitat de transport; ja que les altres variables no poden canviar per arribar a l'equilibri. Els cabals venen imposats, així com la granulometria, que és uniforme, de diàmetre únic.

Per tant la situació esperada és una disminució del pendent per tenir una capacitat de transport inferior a la inicial i igual a la del cabal sòlid que li entra.

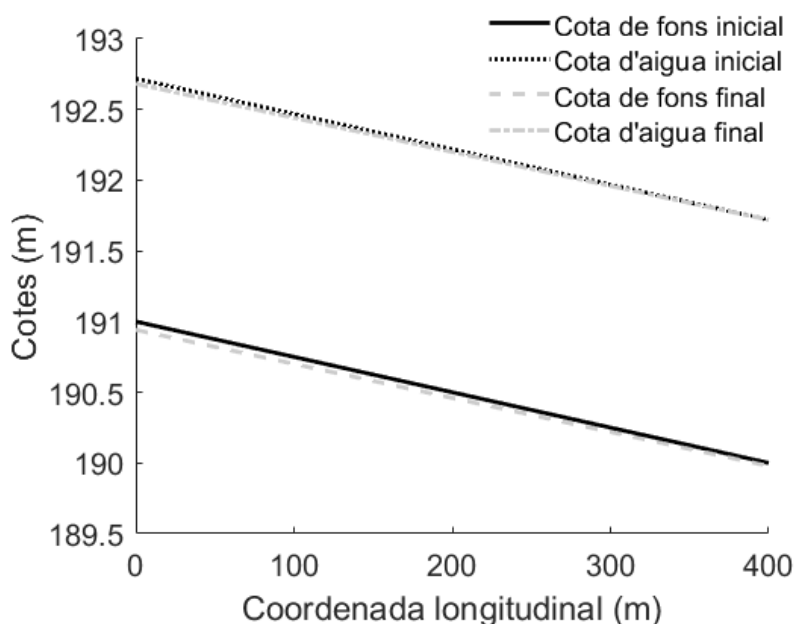


Figura 5-7: Perfil longitudinal del cas 1.3 en llera rectangular. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

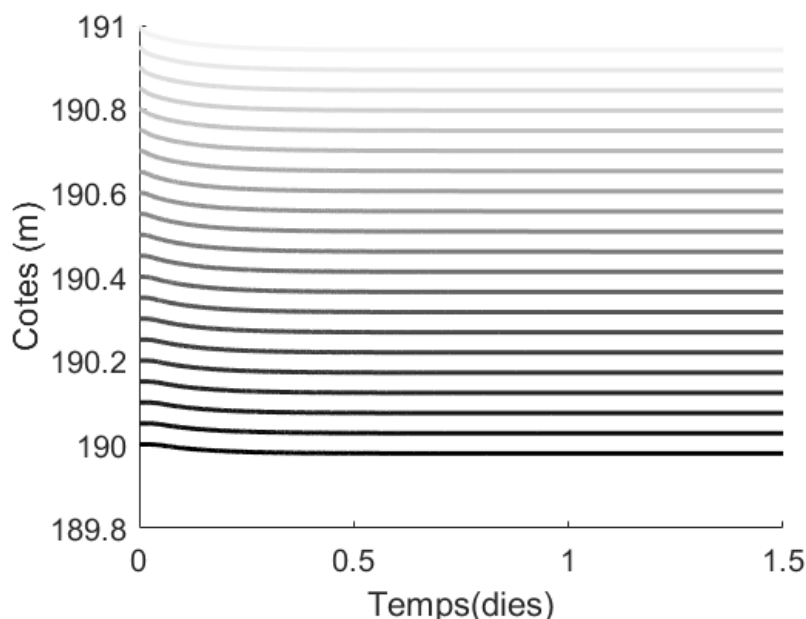


Figura 5-8: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 1.3 en llera rectangular. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Tal com s'esperava el pendent disminueix perquè el cabal d'entrada és inferior al de capacitat. A la Figura 5-7 es pot veure clarament que la llera al cap de quasi un dia i mig ha disminuït el pendent. La làmina d'aigua assoleix a tots els nodes el calat normal, com es pot veure la cota de la làmina d'aigua a l'últim node es manté constant, ja que està imposada, i són els valors a la resta de nodes que varien fins que esdevenen una línia paral·lela a la de les cotes del fons en la situació d'equilibri.

A la Figura 5-8 es pot observar l'evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes. S'aprecia com els nodes de més aigües amunt disminueixen de cota més ràpidament, ja que estan forçats per la condició de contorn d'aigües amunt, i que de mica en mica la resta de nodes van disminuint la cota fins arribar a l'equilibri, amb un pendent inferior al que tenien inicialment.

Cal destacar com la cota de l'últim node no es manté constant, això és degut a que inicialment s'imposa un calat normal que no és el mateix del de l'equilibri, ja que el calat normal depèn del pendent del fons i com s'ha justificat el pendent de les cotes de fons varia. Com la cota de la làmina d'aigua és fixa, el que varia és la cota del fons de la llera per obtenir el calat normal. Com el pendent és menor, el calat normal és major (8).

Com es pot veure la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular l'evolució fins a l'equilibri d'una llera rectangular on s'ha disminuït el cabal sòlid d'entrada.

5.1.5. Cas 1.4

El cas 1.4, com s'ha dit a l'apartat 4.3.1, té com a cabal sòlid d'entrada un valor superior al del cas 1.0, és a dir que és superior al que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té el calat normal.

Aquest cas és la situació inversa del cas 1.3, per tant s'espera la mateixa reacció però de signe oposat, és a dir un augment del pendent per tenir una capacitat de transport superior a la inicial i igual a la del cabal sòlid que li entra.

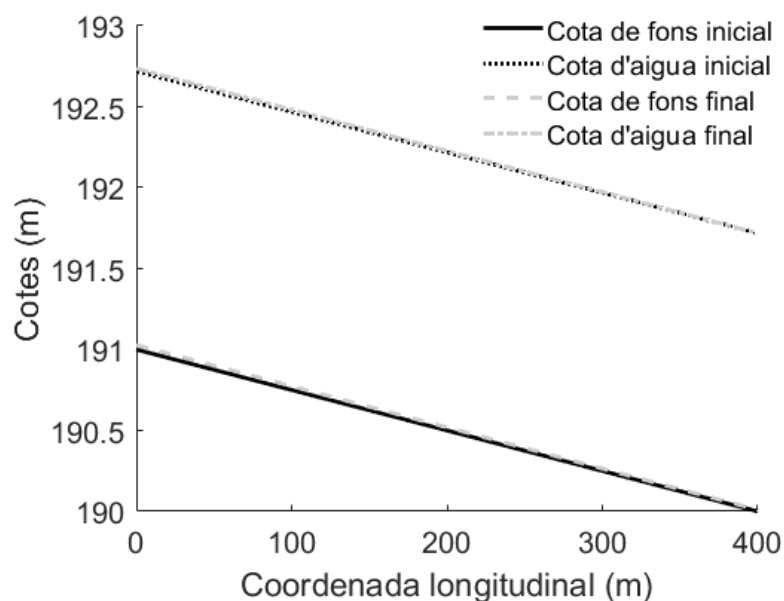


Figura 5-9: Perfil longitudinal del cas 1.4 en llera rectangular. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

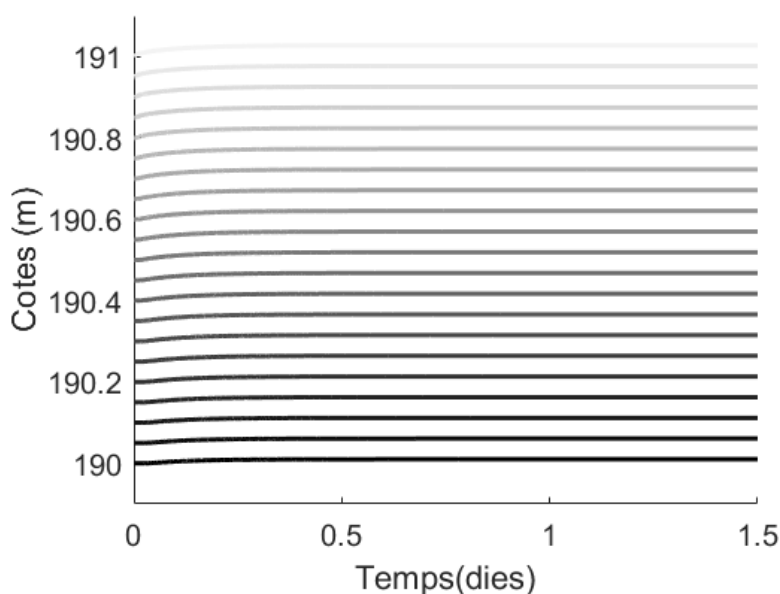


Figura 5-10: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 1.4 en llera rectangular. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Tal com s'esperava el pendent augmenta perquè el cabal d'entrada és superior al de capacitat. A la Figura 5-9 es pot veure clarament que la llera al cap de quasi un dia i mig ha augmentat el pendent creant una petita falca de sediment. La làmina d'aigua assoleix a tots els nodes el calat normal, com es pot veure la cota de la làmina d'aigua a l'últim node es manté constant, ja que està imposada, i són els valors a la resta de nodes que varien fins que esdevenen una línia paral·lela a la de les cotes del fons en la situació d'equilibri.

A la Figura 5-10 es pot observar l'evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes que és inversa a la de la Figura 5-8, per tant es pot aplicar el raonament invers del de l'apartat 5.1.4.

Com es pot veure la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular l'evolució fins a l'equilibri d'una llera rectangular on s'ha augmentat el cabal sòlid d'entrada.

5.2.Llera composta

A continuació s'analitzen els resultats obtinguts per les diferents simulacions amb llera composta. Es mostren alguns resultats per poder explicar millor l'evolució fins arribar a l'equilibri.

5.2.1. Cas 2.0

El cas 2.0, com s'ha dit a l'apartat 4.3.2, és aquell on les condicions de contorn que s'imposen són el cabal sòlid de capacitat aigües amunt i el calat normal aigües avall. És a dir, que està en règim uniforme. Com ja està en equilibri perquè li entra tant sediment de fons com el que és capaç de transportar amb la geometria i la condició de contorn d'aigües avall, s'espera que no hi hagi canvis de la llera ni en pendent ni en cotes.

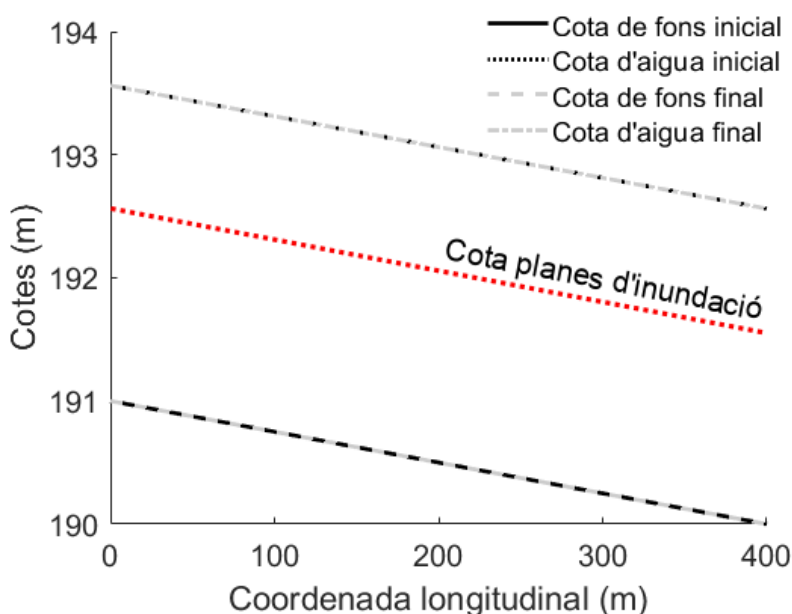


Figura 5-11: Perfil longitudinal del cas 2.0 en llera composta. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors a excepció de la línia puntejada a una distància de 1,5m del fons de la llera que correspon a la cota on comencen les planes d'inundació.

Com es pot veure a la Figura 5-11 les línies grises se superposen a les negres, de manera que aquestes no es veuen, és a dir que la situació al cap de quasi dos dies és la mateixa que hi havia inicialment. A la Figura 5-12 es pot veure

l'evolució temporal dels diferents nodes. Tots els nodes mantenen la cota que tenen inicialment. Per tant, no hi ha canvis, tot està en règim uniforme. La làmina d'aigua i la llera són dues línies paral·leles, ja que no hi ha variacions espacials.

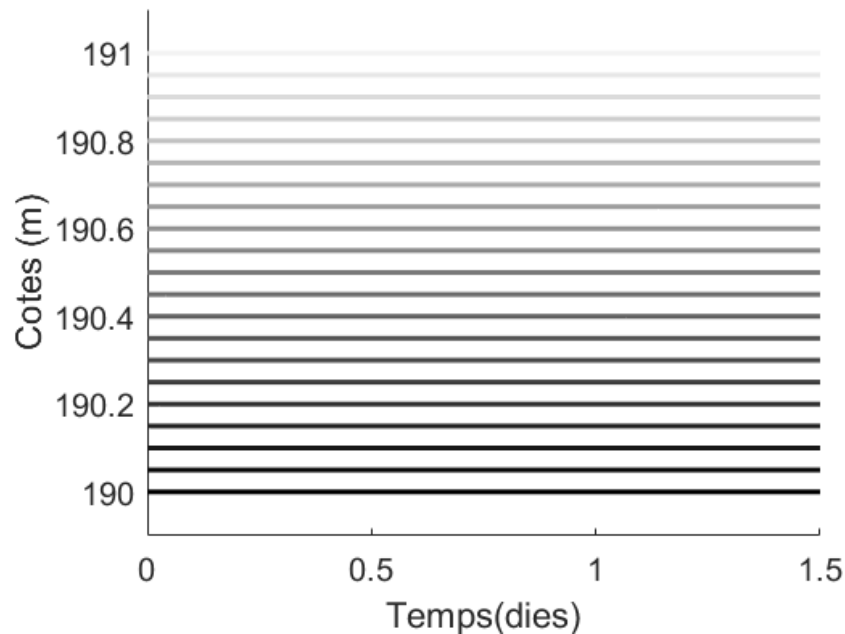


Figura 5-12: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 2.0 en llera composta. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com s'ha comprovat, la situació esperada correspon amb el que s'ha obtingut al model. Per tant el model és capaç de simular una llera composta en règim uniforme.

5.2.2. Cas 2.1

El cas 2.1, com s'ha dit a l'apartat 4.3.2, té com a cabal sòlid d'entrada el mateix que el cas 2.0, és a dir que és el que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té un calat inferior al calat normal.

Com el calat a l'últim node és inferior al calat normal i aigües amunt tendeix al calat normal, inicialment tenim una corba de rabeig tipus M2, el pendent motriu ha augmentat respecte el del cas 2.0, que és el règim uniforme. Aquest fet dóna lloc a un augment de la capacitat de transport i per tant provocarà erosió.

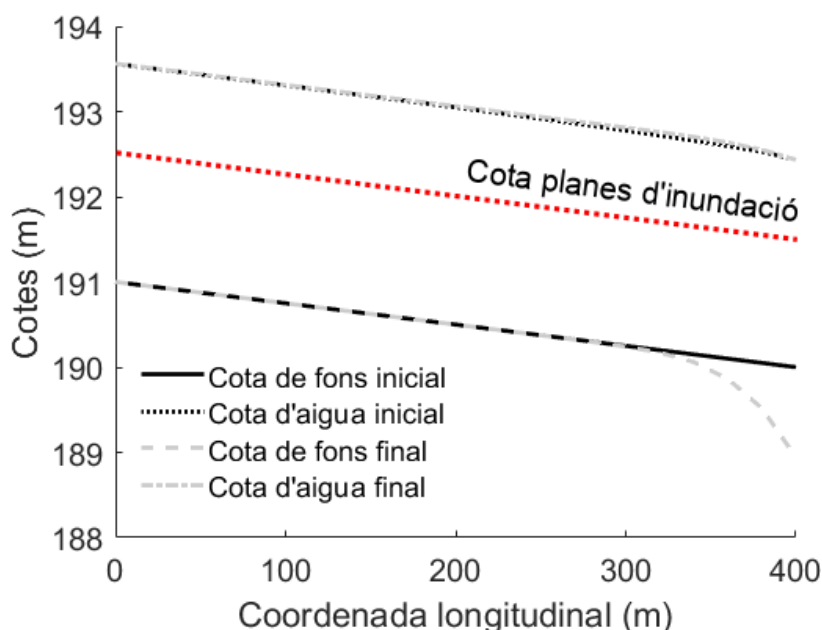


Figura 5-13: Perfil longitudinal del cas 2.1 en llera composta. La nomenclatura és la mateixa que la de la figura anterior.

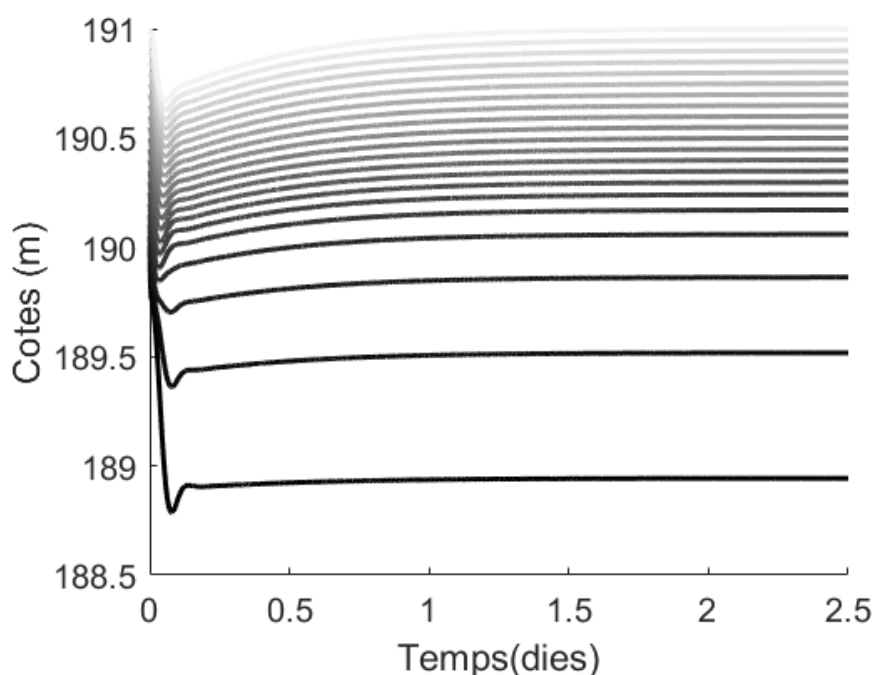


Figura 5-14: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 2.1 en llera composta. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com es pot veure a la Figura 5-13 en situació d'equilibri es manté el pendent i la cota dels primers nodes, però hi ha erosió i canvi de pendent aigües avall, forçat per la condició de contorn d'aigües avall, que és 0,95 vegades el calat normal. L'erosió provocada per la condició de contorn aigües avall acaba provocant una M1 a la situació d'equilibri, ja que per una banda aigües avall pot transportar més del que li arriba i la cota d'aigua és fixa (erosió i augment de calat) i per altra banda aigües amunt, lluny de la condició de contorn aigües avall, el pendent i la cota del fons són els mateixos que hi havia inicialment.

Per explicar el motiu pel qual l'equilibri en llera composta en aquest cas es produeix amb un pendent igual a l'inicial hem de basar-nos en la definició que utilitzem per determinar que el tram d'estudi està en equilibri. Considerem que s'ha arribat a la situació d'equilibri quan les tensions del fons són les mateixes a tots els nodes de càlcul per un mateix instant de temps, és a dir que la variació espacial de les tensions de fons és nul·la.

Per a que la variació espacial sigui nul·la cal que les variables que defineixen les tensions de fons no variïn (22). La densitat i la gravetat són valors que s'assumeixen constants per definició, per tant, les variables que poden canviar són el radi hidràulic (5) i el pendent motriu (2). Perquè les tensions siguin constants vol dir que una o les dues variables són constants o que varien de manera inversa (quan un augmenta, l'altre ho fa amb la mateixa magnitud, però disminuint).

Lluny de la condició de contorn aigües avall el pendent motriu i el radi hidràulic es mantenen constants espacialment. Perquè es mantinguin constants no hi pot haver diferència de calats entre seccions, ja que una diferència del calat implica diferències en l'àrea i el perímetre mullat i per tant el radi hidràulic no serà constant. Es podria donar el cas que el calat es mantingués constant i fos la cota del fons de la llera la que canviés. Però això resultaria també amb àrees i perímetres mullats diferents. Per tant, no hi pot haver variació espacial de la cota del fons, és a dir que l'increment de cota del fons és constant a tots els nodes i per tant el pendent és el mateix que hi havia inicialment, ja que aigües amunt no hi ha una entrada en excés ni en dèficit de material.

En aquest cas, on el cabal sòlid d'entrada és el de capacitat, resulta que la cota del fons és la mateixa que inicialment.

A prop de la condició de contorn es produeix l'altra situació: el radi hidràulic i el pendent motriu varien de manera inversa, és a dir, que van canviant de manera que en totes les seccions les tensions de fons són les mateixes. Això en realitat és una variació espacial del cabal unitari, degut a l'erosió de la llera principal, que és el que fa que hi hagi un perfil no lineal en aquesta zona.

Quan la llera és rectangular poden haver-hi canvis de cota del fons mantenint el radi hidràulic constant, és per això que hi ha canvi de pendent a tots els nodes. A més que el cabal unitari també es manté constant.

A la Figura 5-14 es veu com tots els nodes pateixen erosió degut a la condició de contorn d'aigües avall, però els primers nodes recuperen l'erosió fins aconseguir la cota que tenien inicialment, respectivament. De manera que el pendent es manté. És interessant observar la rapidesa amb que es produeix l'erosió als primers instants de temps i com tarda quasi 20 vegades més a recuperar-se fins arribar a l'equilibri. És important destacar que l'ajust a les noves condicions no es fa seguint una única fase d'erosió o acreció.

5.2.3. Cas 2.2

El cas 2.2, com s'ha dit a l'apartat 4.3.2, té com a cabal sòlid d'entrada el mateix que el cas 2.0, és a dir que és el que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té un calat superior al calat normal.

En el primer instant de temps com el calat a l'últim node és superior al del calat normal i aigües amunt tendeix al calat normal, tenim una corba de rabeig tipus M1, el pendent motriu ha disminuït respecte el del cas 2.0, que és el règim uniforme. Això dona lloc a una disminució de la capacitat de transport i per tant provocarà acumulació de sediment.

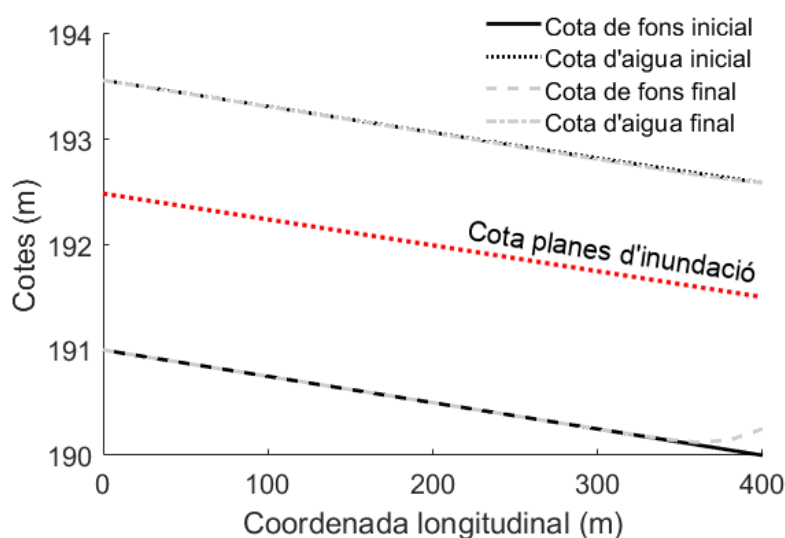


Figura 5-15: Perfil longitudinal del cas 2.2 en llera composta. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

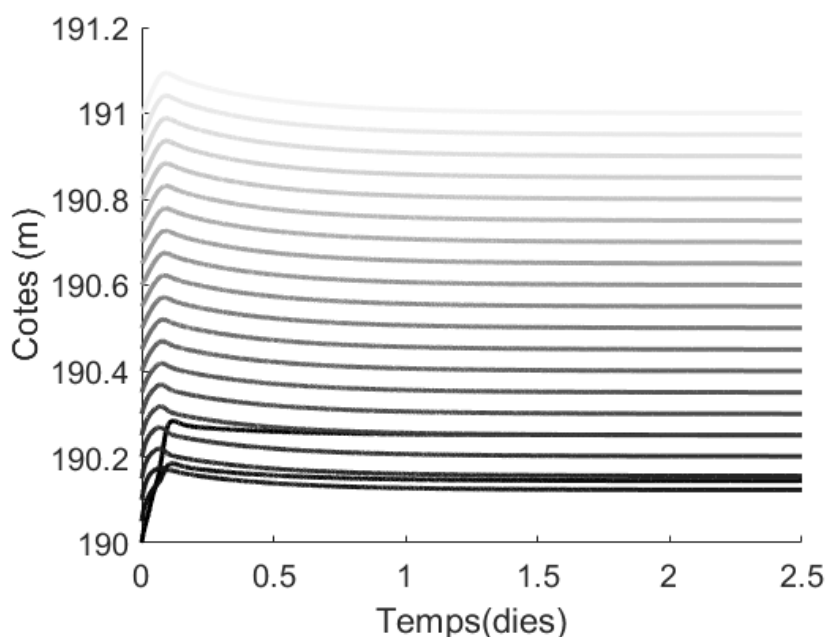


Figura 5-16: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 2.2 en llera composta. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com es pot veure a la Figura 5-15 en situació d'equilibri es manté el pendent i la cota dels primers nodes, però hi ha acumulació de sediment i canvi de pendent aigües avall, forçat per la condició de contorn d'aigües avall, que és 1,01 vegades el calat normal. L'acumulació de sediment provocada per la condició de contorn aigües avall acaba provocant una M2 a la situació d'equilibri, ja que per una banda aigües avall pot transportar menys del que li arriba i la cota d'aigua és fixa (acumulació de sediment i disminució de calat) i per altra banda aigües amunt, lluny de la condició de contorn aigües avall, el pendent i la cota del fons són els mateixos que hi havia inicialment.

Pel mateix raonament que a l'apartat anterior, el pendent i la cota del fons d'equilibri dels nodes més llunyans de la condició de contorn és el mateix que l'inicial.

A la Figura 5-16 es veu com tots els nodes pateixen acumulació de sediment degut a la condició de contorn aigües avall, però els nodes més llunyans a la condició de contorn aigües avall es tornen a erosionar recuperant la cota inicial, de manera que el pendent es manté.

5.2.4. Cas 2.3

El cas 2.3, com s'ha dit a l'apartat 4.3.2, té com a cabal sòlid d'entrada un valor inferior al del cas 2.0, és a dir que és inferior al que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té el calat normal corresponent a l'estat inicial.

Com el calat a l'últim node és el calat normal, inicialment a tots els nodes hi ha el calat normal. Però com està entrant menys sediment del que pot transportat la tendència serà a reduir la capacitat de transport (reducció de les tensions de fons) fins assolir una capacitat igual a la del cabal sòlid que li entra.

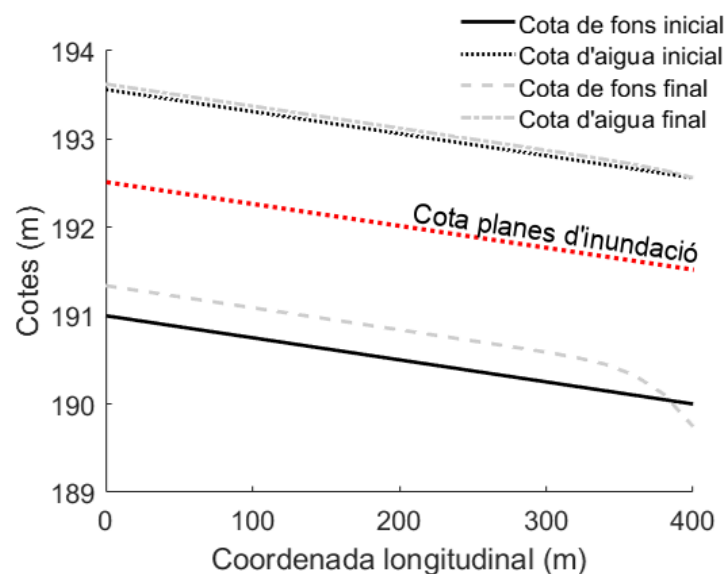


Figura 5-17: Perfil longitudinal del cas 2.3 en llera composta. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

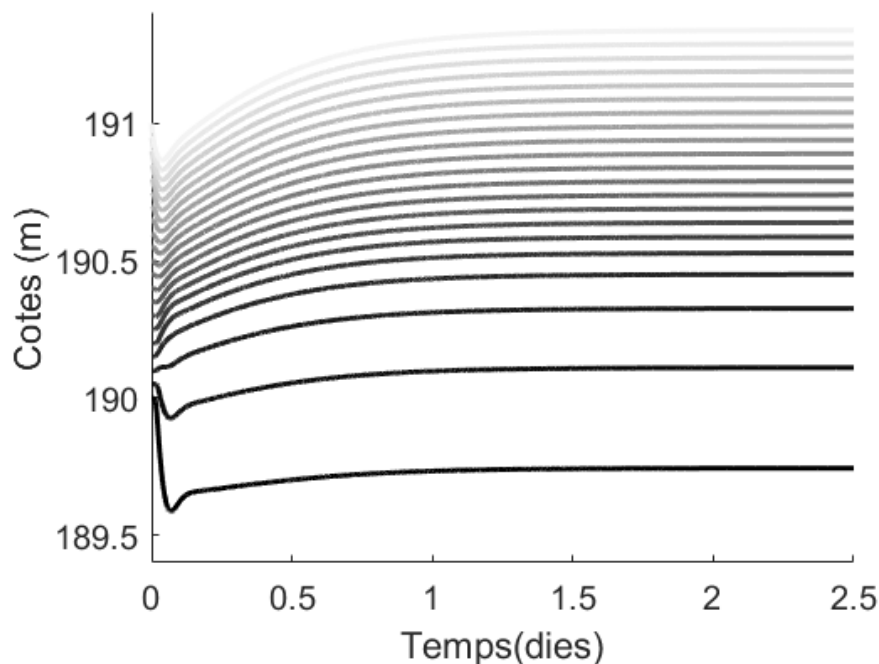


Figura 5-18: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 2.3 en llera composta. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com es pot veure a la Figura 5-17 en situació d'equilibri es manté el pendent als primers nodes, els quals també augmenten de cota paral·lelament a la llera inicial. En equilibri es forma una M1.

La situació es podria equiparar amb el cas 2.1 on també es formava una M1 a la situació d'equilibri. En aquest cas es forma degut al fet que per una banda aigües avall s'ha erosionat i la cota de la làmia d'aigua és fixa de manera que augmenta el calat i per l'altra perquè aigües amunt, lluny de la condició de contorn aigües avall, s'ha acumulat material.

El raonament que justifica que el pendent lluny de la condició de contorn aigües avall sigui igual a l'inicial és el que s'ha realitzat en l'apartat 5.2.2. En aquest cas la cota final no és la mateixa que hi havia inicialment ja que el cabal sòlid que entra és inferior al de capacitat i ha de trobar una nova configuració per arribar a l'equilibri. Segons l'analogia de la balança de Lane (veure la Figura 4-10) a l'entrar un cabal sòlid inferior respecte el de capacitat de la geometria existent (cas 2.0) es produeix una erosió (veure el comportament inicial de la cota de fons de tots els nodes a la Figura 5-18). Per contrarestar-la i arribar a un nou equilibri han de variar alguna de les altres condicions: el diàmetre de sediment, el pendent o el cabal líquid unitari.

La primera variable, el diàmetre del material del fons, és fixa, ja que el sediment existent a la llera i el que entra té el mateix diàmetre.

La segona variable, lluny de la condició de contorn aigües avall, s'ha justificat que és igual a la inicial.

Per tant, només queda la tercera variable. En una llera rectangular el cabal unitari és una variable fixa, però en aquest cas d'estudi, on només permetem erosió a la llera principal, el cabal unitari que passa per aquesta pot variar.

Per poder compensar l'erosió provocada per la poca entrada de sediment, el cabal líquid unitari ha de disminuir. La disminució ha de ser deguda a una reducció del calat que pot ser degut a una disminució de la cota de la làmina d'aigua o a un augment de la cota del fons de la llera. Si el que augmenta és la cota de fons de la llera, la "pèrdua de cabal unitari" es concentra a la llera principal, de manera que és el que acaba passant.

Una altra manera d'analitzar-ho és a través de les tensions de fons. En secció composta, tal i com s'ha definit el model, la reducció de les tensions és funció de la profunditat de la llera, que afecta el perímetre mullat, i del calat, que afecta a l'àrea. Les tensions de fons es redueixen més reduint el calat (àrea) que a augmentant la profunditat de la llera (perímetre mullat). Per tant, la situació d'equilibri lluny de la condició de contorn és aquella que té un calat inferior a l'inicial i això s'ha aconseguit augmentant la cota del fons (acumulació de sediment). De retruc s'ha augmentat la cota de la làmina d'aigua, però el calat resultant és inferior al que hi havia inicialment,

Per altra banda a prop de la condició de contorn aigües avall, com que la cota de la làmina d'aigua és fixa, la reducció de les tensions de fons s'ha assolit reduint la cota del fons (augmentant la profunditat de la llera). Com es pot observar a la resta de seccions la cota de la làmina d'aigua ha pujat una mica, però poc en comparació amb l'augment de la cota del fons de la llera.

Si es mira la Figura 5-18, es pot veure com inicialment els nodes pateixen una disminució de cota, per tant una erosió com era d'esperar pel menor cabal sòlid d'entrada, però a mesura que passa el temps es recuperen, més lentament, i acaben guanyant cota respecte la inicial per trobar el nou equilibri. La situació final és similar a la del cas 2.1. Inicialment en els dos casos hi ha una capacitat de transport superior a la del cabal sòlid d'entrada. La diferencia del comportament allunyat de la condició de contorn aigües avall ja s'ha justificat.

5.2.5. Cas 2.4

El cas 2.4, com s'ha dit a l'apartat 4.3.2, té com a cabal sòlid d'entrada un valor superior al del cas 2.0, és a dir que és superior al que pot transportar segons el pendent de fons i el diàmetre de sediment donat, i de condició de contorn aigües avall té el calat normal.

Com el calat a l'últim node és el calat normal, inicialment a tots els nodes hi ha el calat normal. Però com està entrant més sediment del que pot transportat la tendència serà a augmentar la capacitat de transport (augment de les tensions de fons) fins assolir una capacitat igual a la del cabal sòlid que li entra.

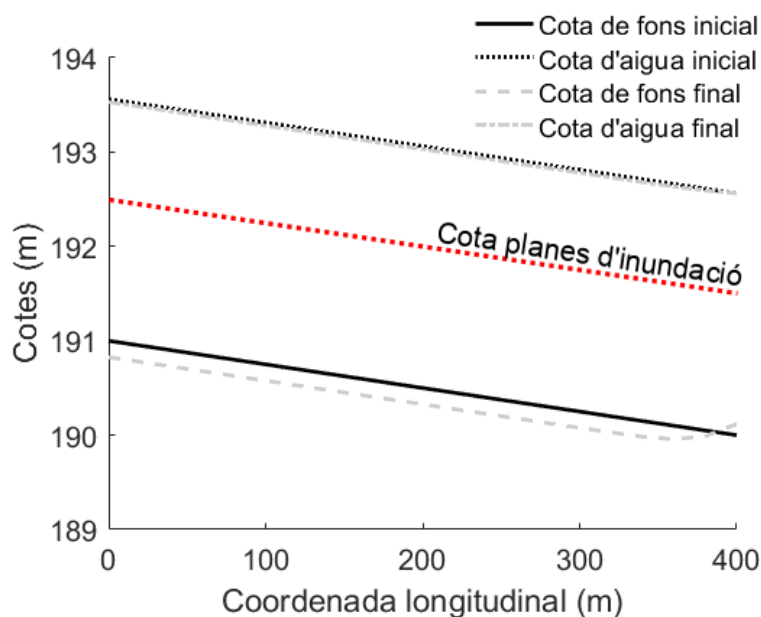


Figura 5-19: Perfil longitudinal del cas 2.4 en llera composta. La nomenclatura és la mateixa que la de les figures anteriors.

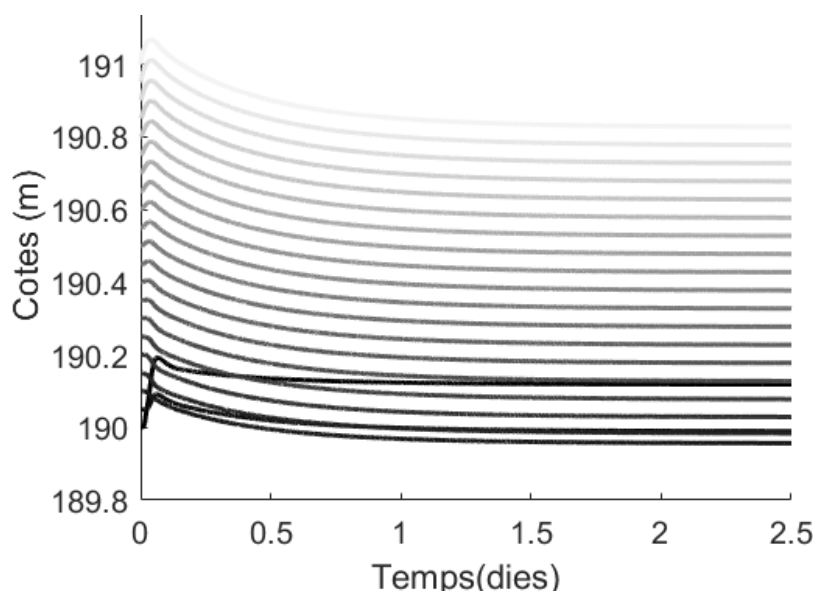


Figura 5-20: Evolució temporal de la cota de fons dels diferents nodes pel cas 2.4 en llera composta. Com més fosca és la línia més aigües avall està el node.

Com es pot veure a la Figura 5-19 en situació d'equilibri es manté el pendent als primers nodes, els quals també disminueixen de cota paral·lelament a la llera inicial. En equilibri es forma una M2.

La situació d'aquest cas es podria justificar aplicant els raonaments a la inversa del cas anterior. És a dir que la situació d'equilibri als nodes lluny de la condició de contorn aigües amunt

Si s'observa la Figura 5-20, es pot veure com inicialment els nodes pateixen un augment de cota, per tant una acumulació de sediment com era d'esperar per l'augment del cabal sòlid d'entrada, però a mesura que passa el temps s'erosionen, més lentament, i acaben tenint una cota inferior a la inicial. La

situació final és similar a la del cas 2.2. Inicialment en els dos casos hi ha una capacitat de transport inferior a la del cabal sòlid d'entrada. La diferencia del comportament allunyat de la condició de contorn aigües avall s'ha justificat a l'apartat anterior pel cas invers.

5.3.Sensibilitat a la dispersió granulomètrica

A continuació es mostren els resultats obtinguts de l'anàlisi de sensibilitat a la dispersió geomètrica de la granulometria. No es mostraran perfils finals i inicials ni l'evolució temporal de les cotes del fons de la llera fins arribar a l'equilibri, ja que això ja s'ha analitzat als apartats 5.1 i 5.2. Els anàlisis realitzats són vàlids pels casos d'aquest apartat amb desviació geomètrica unitària.

5.3.1. Situació inicial

Per tal d'avaluar els resultats primer s'ha analitzat la situació inicial, entenent com a situació inicial el primer instant de temps per totes les simulacions. L'anàlisi es realitza perquè les condicions inicials de la condició de contorn a l'extrem inferior depenen del calat normal, el qual depèn del D90, és a dir que la condició inicial serà diferent per cada simulació amb una desviació geomètrica diferent, però igual entre el cas 3.1 i 3.2 i el cas 3.3 i 3.4 respectivament

Primerament ens centrarem en els dos casos on la llera és rectangular i que únicament és diferenciada pel cabal sòlid d'entrada. Recordem que en un, el cabal sòlid és inferior a la capacitat inicial de tots els nodes (cas 3.3) i l'altre és un valor intermedi entre la capacitat inicial del primer node i la del últim (cas 3.4) i per tant major. Al tractar-se de corbes de rabeig tipus M2 els últims nodes tenen més capacitat de transport.

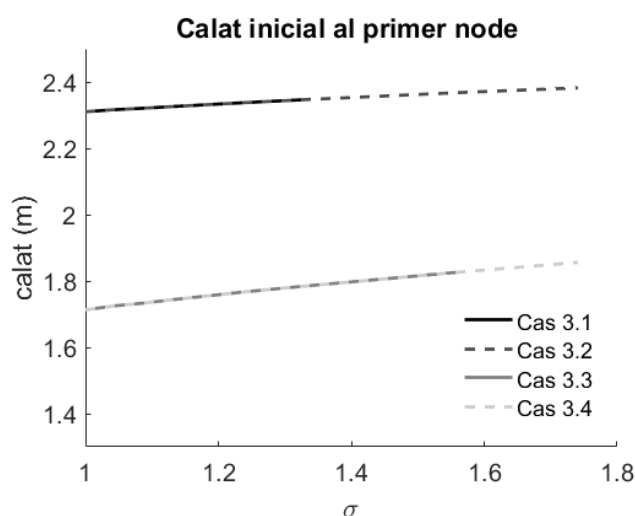


Figura5-21: Calat inicial dels 4 casos al primer node en funció de la desviació geomètrica.

Com es pot observar, la situació inicial és igual pels dos casos amb llera rectangular, això és degut a que la situació en el primer instant de temps és independent del cabal sòlid d'alimentació.

En els instants de temps successius i en la situació d'equilibri es pot veure l'efecte que té el cabal sòlid en les cotes del fons, repercutint així en totes les variables. A la Figura 5-22 es compara la diferència de cota de fons entre els casos 3.3 i 3.4 amb una sigma de 1,33 en diferents instants de temps, per tant, l'única diferència entre les dues simulacions és el cabal sòlid d'entrada.

Es pot veure com la cota del fons del cas 3.4 va augmentant respecte la del cas 3.3 d'aigües amunt (node 1) a aigües avall (node 21) a mesura que passa el temps. La variació de la cota ve donada per la condició de cabal sòlid d'entrada. Com s'ha definit anteriorment, el cas 3.3 té un cabal sòlid d'alimentació menor al del cas 3.4; és per això que es produeix la disminució relativa de la cota entre els dos casos.

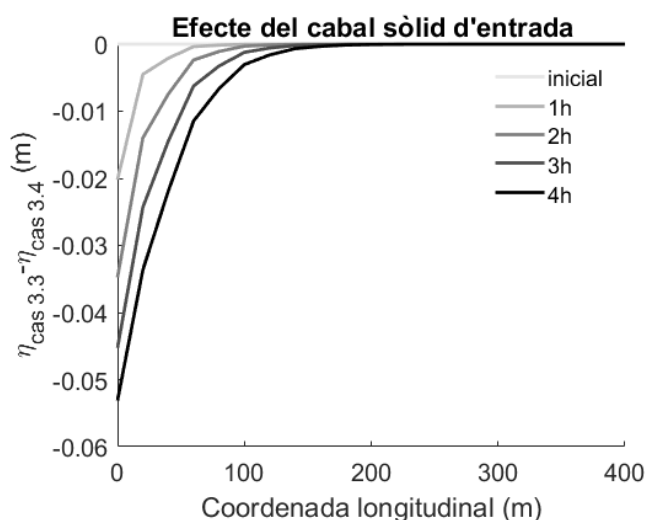


Figura 5-22: Efecte del cabal sòlid d'entrada (condició de contorn de l'extrem superior).

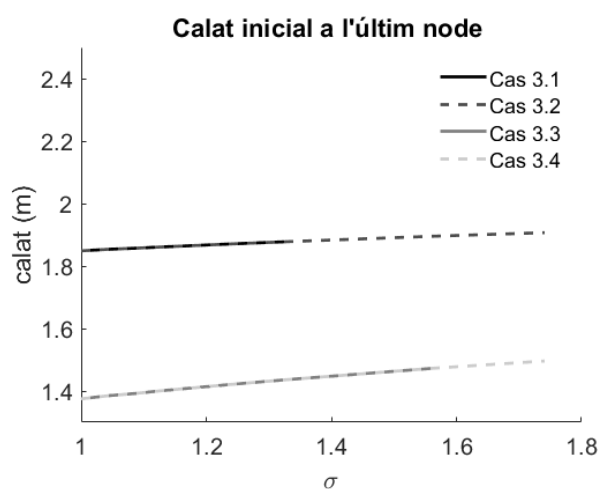


Figura 5-23: Calat inicial dels 4 casos a l'últim node en funció de la desviació geomètrica.

Analitzant l'evolució del calat amb l'augment de la sigma es pot observar com el calat augmenta, a continuació es justifica aquest comportament. El calat a l'últim node (Figura 5-23) ve imposat per la condició de contorn, és a dir un calat inferior al normal. El valor del calat normal (8) és creixent (si un augmenta, l'altre també) amb el coeficient de Manning (7) que aquest, al seu torn, és creixent amb el D_{90} de la distribució granulomètrica de la llera (si un augmenta, l'altre també). Per altra banda, tal i com estan definides les granulometries, com major sigui el D_{90} , major serà la desviació geomètrica, com es pot veure a la Figura 4-13. Per tant, com major sigui la desviació geomètrica de la granulometria de la llera, major serà el calat de l'últim node al primer instant de temps.

Pels altres nodes, i agafant com a referència el primer node (Figura 5-21), el calat es calcula amb el règim gradualment variat com s'ha explicat a l'apartat 4.1.1. En aquest cas la desviació geomètrica afecta de la mateixa manera que en el cas anterior el càlcul del calat. Però degut a que entra en joc el calat del node aigües avall, l'increment de calat a aigües amunt cada cop és major. Això resulta en un increment de calat major al primer node que a l'últim per un mateix increment de la desviació geomètrica.

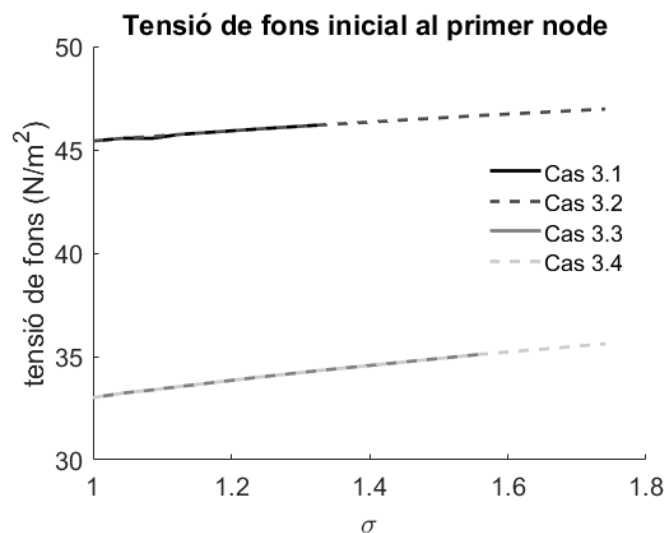


Figura 5-24: Tensió de fons inicial dels 4 casos al primer node en funció de la desviació geomètrica.

Pel que fa a les tensions de fons (taus) també augmenten a l'augmentar la desviació geomètrica de la granulometria de la llera (Figura 5-24). La justificació és directa amb la definició de la tensió de fons (22) ja que és directament proporcional al radi hidràulic de la llera i al pendent motriu. Seguint el mateix raonament que pels calats tenim que a major desviació geomètrica, major D_{90} , major coeficient de Manning i major calat, que per una llera rectangular més ampla que profunda es pot equivaldre al radi hidràulic. Per tant, tenim com a conclusió que a major desviació geomètrica, major radi hidràulic, és a dir, major tensió de fons. Per altra banda, el pendent motriu també augmenta amb el valor de la desviació geomètrica a causa de l'augment del coeficient de Manning.

En el primer instant de temps les tensions de fons adimensionals tenen la mateixa tendència que les dimensionals, ja que el D_{50} inicial és igual per totes

les simulacions, així doncs, el valor canvia perquè canvia el valor de la tensió de fons (23).

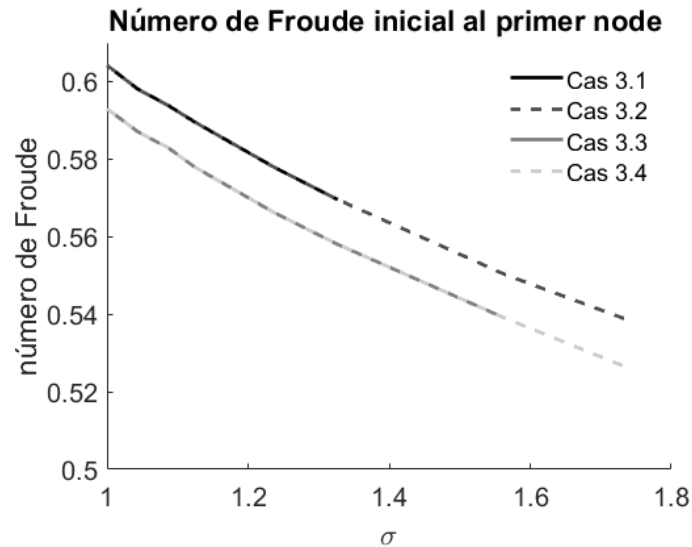


Figura 5-25: Número de Froude inicial dels 4 casos al primer node en funció de la desviació geomètrica.

L'explicació de la disminució del número de Froude (Figura 5-25) amb l'augment de la desviació geomètrica de la granulometria de la llera s'explica fàcilment a través de la pròpia definició del número de Froude (3). El número de Froude és inversament proporcional a l'àrea, o el que és el mateix, al calat. Per tant, si el calat augmenta, el número de Froude disminueix.

Si analitzem l'efecte que té la desviació geomètrica de la granulometria de la llera en el cas d'una llera composta, podem veure que la tendència és la mateixa que per la llera rectangular. Les magnituds no es poden comparar ja que el cabal líquid que entra és diferent. El que podem comparar és la tendència de les dues situacions (llera composta i llera rectangular).

Començant pels calats es pot observar com el seu augment amb la desviació geomètrica és inferior que en el cas de la llera rectangular. Això és degut a que per un mateix augment de calat l'àrea augmenta molt més gràcies a les planes d'inundació, ja que en totes les simulacions de la llera composta l'aigua ocupa les planes d'inundació. Com a conseqüència el perímetre mullat no augmenta tant comparativament amb l'increment d'àrea, és per això que per un augment de calat el radi hidràulic sempre augmenta. En el cas de l'últim node (Figura 5-23), on el calat ve imposat a partir del calat normal, obtenim que per un mateix augment del coeficient de Manning (recordem que com major sigui la desviació geomètrica, major D_{90} i per tant major coeficient de Manning) no cal que augmenti tant el calat per aconseguir el mateix augment del producte de l'àrea pel radi hidràulic elevat a la dos terços (8).

Per la resta de calats calculats amb el règim gradualment variat i agafant de referència el del primer node, com en els casos de llera rectangular, obtenim que

el calat augmenta com major sigui la desviació geomètrica i que el calat augmenta més en el primer que en l'últim (Figura5-21). El motiu d'aquest increment s'ha justificat a on s'explica el cas de les lleres rectangulars. La justificació per la qual el calat augmenta menys en la llera composta que en la rectangular és degut a que, com s'ha explicat, el calat d'un node depèn del calat del d'aigües avall, per tant, si l'últim node augmenta menys en secció composta, també ho faran els altres. A més a més del fet que per un increment donat de calat en secció composta, l'àrea i el radi hidràulic augmenten més que pel mateix increment de calat en secció rectangular.

Les tensions de fons en secció composta (Figura5-24) també augmenten a l'augmentar la desviació geomètrica de la granulometria, però l'augment és inferior al de la secció rectangular. Aquest fet és degut a la tendència de les variables amb que es calculen. Com s'ha dit abans són principalment el radi hidràulic de la llera i el pendent motriu. El primer augmenta menys en secció composta ja que l'àrea d'aigua continguda a la vertical de la llera principal és força inferior, degut a la quantitat d'aigua que circula per les planes d'inundació, a la que tindria si la llera fos rectangular i la petita disminució del perímetre mullat de la llera en secció composta és inferior a la disminució d'àrea. Per altra banda, el pendent motriu també augmenta menys en llera composta que en llera rectangular, ja que depèn del calat i, com s'ha raonat abans, el seu augment és inferior. Tot això resulta en un augment inferior de les tensions en llera composta que en llera rectangular.

Com ja s'ha explicat anteriorment pel cas de la secció rectangular, les tensions de fons adimensionals en el primer instant de temps tenen la mateixa tendència que les dimensionals, ja que el D_{50} inicial és igual per totes les simulacions, així doncs, el valor canvia perquè canvia el valor de la tensió de fons (23).

El número de Froude en secció composta disminueix a mesura que augmenta la desviació estàndard pel mateix raonament que en secció rectangular. La seva disminució amb l'augment de la desviació geomètrica és lleugerament inferior en llera composta, tot i que l'increment d'àrea sigui major. L'explicació d'aquest fet es troba a l'analitzar l'expressió de la derivada del número de Froude respecte la desviació estàndard:

$$\frac{dFr}{d\sigma} = \frac{d\left(\sqrt{\frac{Q^2 B}{g A^3}}\right)}{d\sigma} = -\frac{3}{2} \frac{Fr}{A} \frac{dA}{d\sigma} \quad (29)$$

Com s'ha raonat als paràgrafs anteriors la derivada a l'àrea respecte de la desviació geomètrica és major en el cas de la secció composta (de l'ordre de 2,6 vegades). El número de Froude en els dos casos és similar, sent lleugerament major en el cas de la secció composta (degut a la major amplada de la làmina lliure i del cabal), però per altra banda, el valor de l'àrea és més de 2,7 vegades major en secció composta. La combinació de tots aquests factors fa que la derivada del número de Froude respecte la desviació geomètrica en el cas de secció composta sigui lleugerament inferior.

5.3.2. Situació d'equilibri

Entenem com a situació d'equilibri la situació en la que ja no es produeixen canvis en la llera, de manera que les tensions de fons són iguals per tots els nodes (Figura 5-28) i tota la capa activa de la llera té la mateixa distribució granulomètrica (Figura 5-27). Això implica que la configuració del riu (pendent i granulometria del fons) ha canviat per tal de ser capaç de transportar el material sòlid que li entra, tant en magnitud total com per cada classe granulomètrica. En el casos de la llera rectangular l'equilibri s'aconsegueix quan s'arriba al règim uniforme, en canvi, en la llera composta l'equilibri s'assoleix en règim gradualment variat.

L'equilibri en règim gradualment variat també s'assoleix, per exemple, quan es produeixen eixamplaments o estrenyiments del riu. Al document (Bolla Pittalunga, et al., 2013) s'explica aquest fenomen.

Pel cas de llera composta, s'ha observat que el cabal unitari que passa pel la llera principal varia al llarg dels nodes. A la Figura 5-26 es pot veure com el cabal unitari de la llera va augmentant aigües avall i de manera oposada el cabal de les planes va disminuint. La suma dels dos cabals es manté constant.

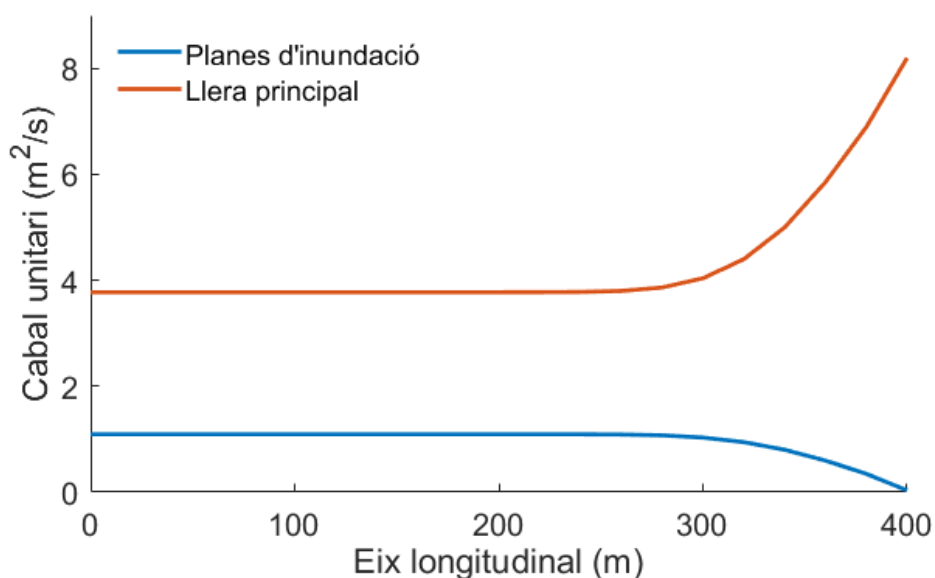


Figura 5-26: Evolució del cabal unitari de la llera i de les planes al llarg dels nodes en la situació d'equilibri.

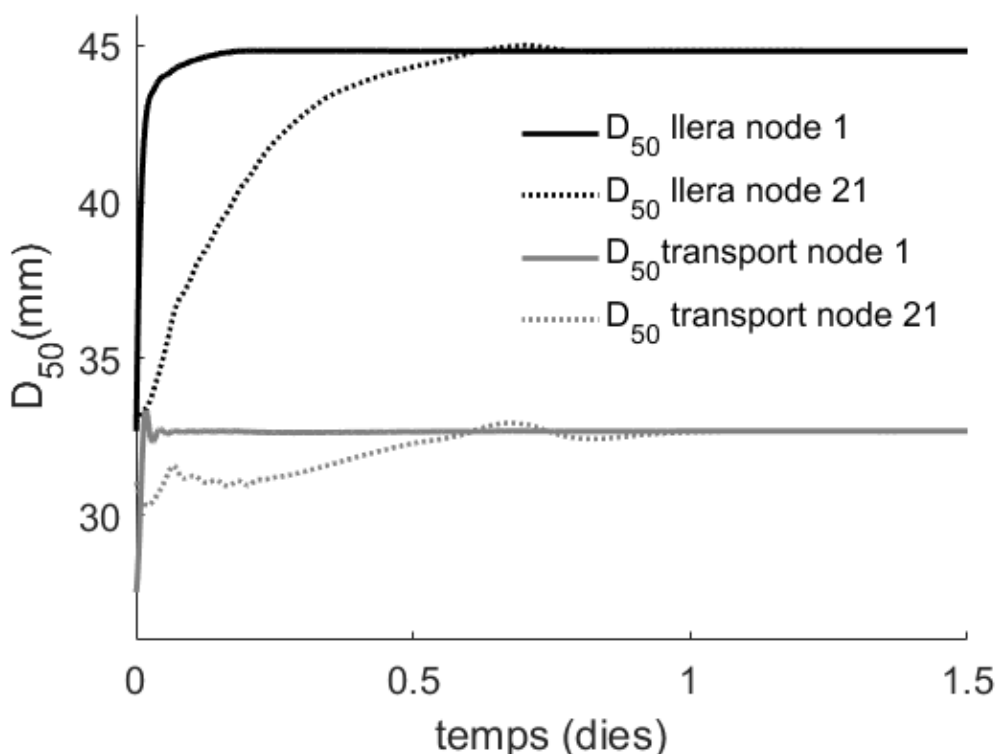


Figura 5-27: Evolució temporal del D_{50} de la llera i del transport pel cas 3.3 amb $\sigma=1,33$.

A la Figura 5-27 es pot veure l'evolució temporal del D_{50} tant de la llera, en negre, com del material transportat, en gris. Les línies contínues representen els valors al primer node aigües amunt i les línies puntejades al de l'últim node aigües avall. L'evolució d'altres diàmetres característics com el D_{16} , D_g , D_{84} o el D_{90} és la mateixa. S'han representat els valors del cas 3.3 amb una desviació geomètrica de 1,33, però l'evolució de les altres simulacions és la mateixa, sent vàlid així, el mateix raonament.

Com es pot observar, el material de la llera en el primer node (D_{50} llera node 1) es cuirassa ràpidament augmentant el valor del D_{50} . Aquest fet és degut a que el material fi es transporta més fàcilment, de manera que el material que queda acumulat a la llera cada cop és major, fins que arriba a l'equilibri i ja no augmenta més. L'últim node (D_{50} llera node 21) també es va cuirassant, però triga més, ja que aquest fenomen està induït per la condició de contorn aigües amunt; és a dir, que la "pertorbació" es propaga d'aigües amunt a aigües avall.

Al cap d'un dia aproximadament els valors del D_{50} del primer node i de l'últim ja són el mateix, han arribat a l'equilibri. Tots els nodes intermedis tenen un comportament comprés entre el primer i l'últim node, actuant aquests com a límits.

Pel que fa al material transportat, es pot observar que el valor a l'equilibri és el D_{50} del cabal sòlid d'entrada (que coincideix amb el de la llera en l'instant inicial tal i com s'ha definit a l'apartat 4.3.3). Inicialment el valor que pot transportar el primer node és inferior al de l'últim node, això és degut a que les tensions de fons de l'últim node són majors (Figura 5-28) i permeten transportar material més groller. A continuació s'explicarà amb més detall l'evolució temporal de les

tensions de fons, que són les que governen les característiques del material transportat.

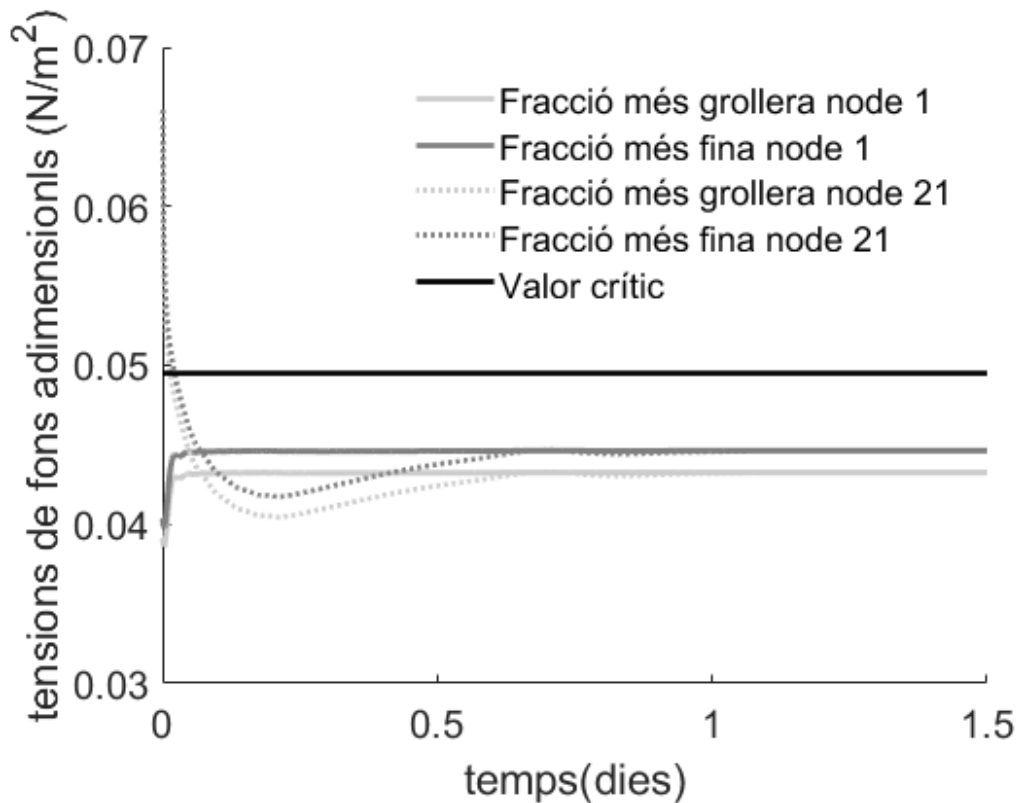


Figura 5-28: Evolució temporal de les tensions de fons adimensionals de les dues fraccions granulomètriques característiques del cas 3.3 amb $\sigma=1,33$.

La Figura 5-28 mostra la tensió crítica en negre (0,0495) i l'evolució temporal de les tensions de fons adimensionals del primer (línies contínues) i l'últim node (línies puntejades) per a les dues fraccions granulomètriques característiques del cas 3.3 (línies grises clares per la classe grollera i grises fosques per la fina). El raonament que segueix a continuació és vàlid per les altres simulacions (amb una sigma diferent a 1,33 o amb les característiques d'algun dels altres tres casos).

Inicialment les tensions de fons adimensionals a l'últim node són majors que les del primer node a causa de la condició de contorn aigües avall (corba de rabeig tipus M2). A mesura que passa el temps totes les tensions de fons adimensionals tendeixen al mateix valor, que és el que permet el transport necessari per moure el sediment que entra i no provocar canvis a la llera.

Un cop explicat què s'entén per situació d'equilibri s'analitzaran, com a la situació inicial, diferents paràmetres obtinguts de les 21 simulacions.

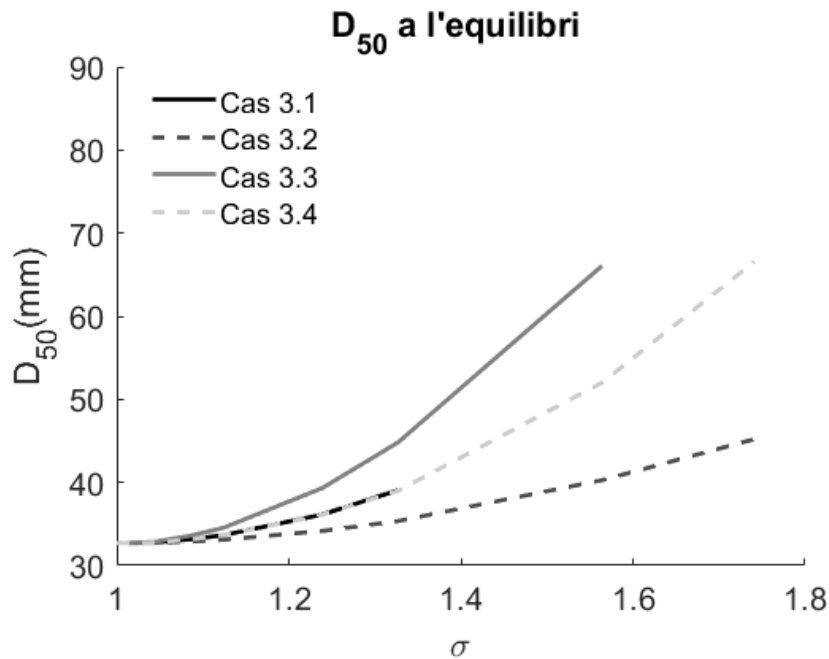


Figura 5-29: D_{50} a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica.

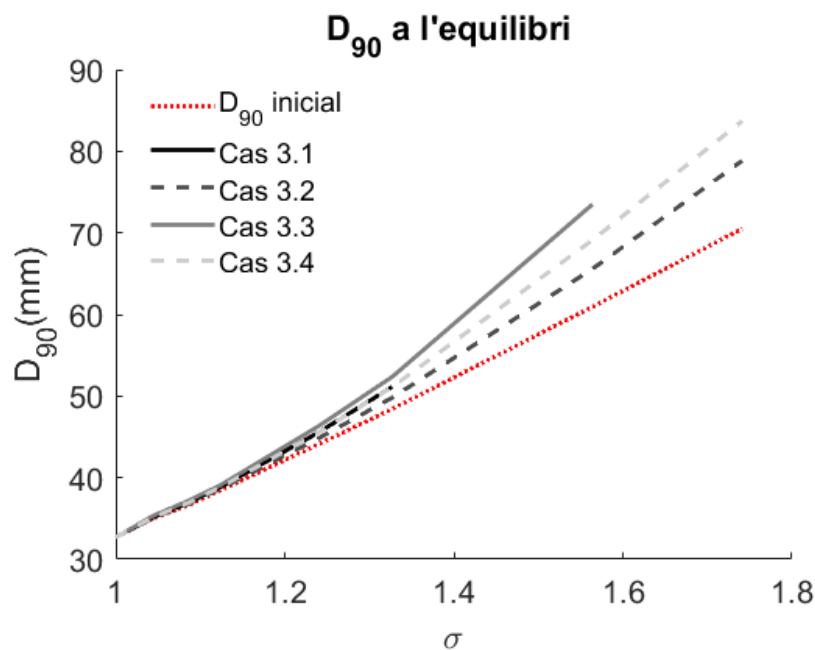


Figura 5-30: D_{90} a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica. La línia vermella puntejada és el valor del D_{90} inicial.

La Figura 5-29 i la Figura 5-30 mostren respectivament l'evolució del D_{50} i el D_{90} de la llera a l'augmentar la desviació geomètrica de la granulometria, en la situació d'equilibri. Com es pot veure el D_{90} augmenta més que el D_{50} en tots els casos a mesura que augmenta la desviació geomètrica, però això és degut al fet que com major sigui la desviació geomètrica major serà el D_{90} inicial, com es pot veure també a la figura. Per tant, el D_{50} a l'equilibri augmenta més que el D_{90} respecte la situació inicial. L'augment dels diàmetres en la situació d'equilibri

s'explica per la formació de la cuirassa a la superfície de la llera (Figura 5-27) i com major sigui la desviació geomètrica, més material groller disponible que costa més de mobilitzar i per tant major diàmetre del sediment de la llera, per tant major D_{50} .

Si analitzem la diferència entre el cas 3.3 i el cas 3.4 podem veure que el cas 3.3, per un mateix augment de la desviació geomètrica, té un major increment del D_{50} , per tant, un diàmetre major de la cuirassa. Recordem que la diferència entre el cas 3.3 i el cas 3.4 és la magnitud del cabal sòlid d'entrada, sent major en el cas 3.4. En aquest cas, quan el cabal sòlid d'entrada és major al de capacitat del primer node el que passa és que el riu no pot transportar tot el material que li entra, per tant s'acumula part del material que entra, el que acaba produint és que la distribució granulomètrica de la llera està alterada pel sediment que entra, mantenint més les proporcions inicials i per tant es cuirassa menys. Passa el mateix amb el cas 3.1 i el cas 3.2. El cas 3.1 té un cabal sòlid d'entrada inferior al del cas 3.2, és per això que el cas 3.2 es cuirassa menys, ja que com no és capaç de transportar tot el que l'hi entra, acumula material i per tant es mantenen més les fraccions granulomètriques.

A continuació s'analitza l'evolució del pendent d'equilibri del fons al primer node amb l'augment de la desviació geomètrica. En el cas de llera rectangular el pendent del fons a tots els nodes és el mateix.

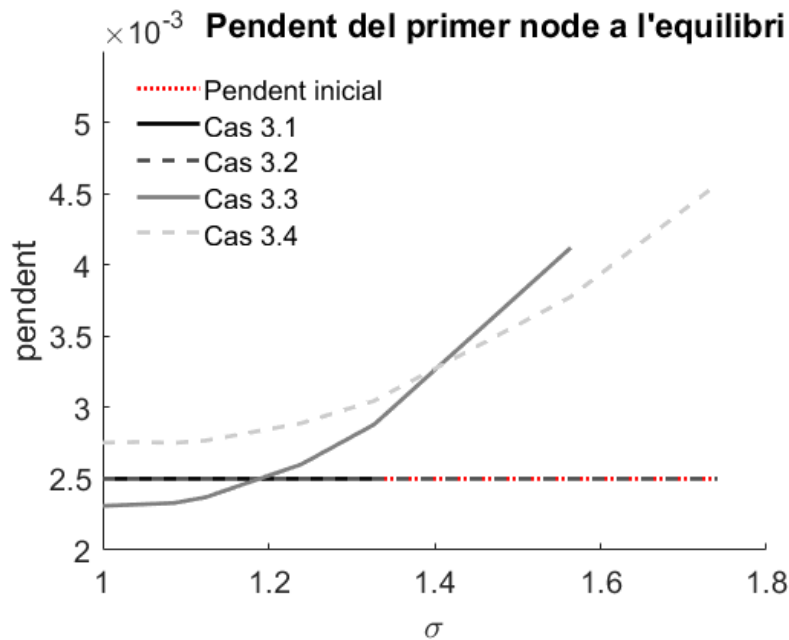


Figura 5-31: Pendent del fons a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica. La línia vermella puntejada és el pendent inicial.

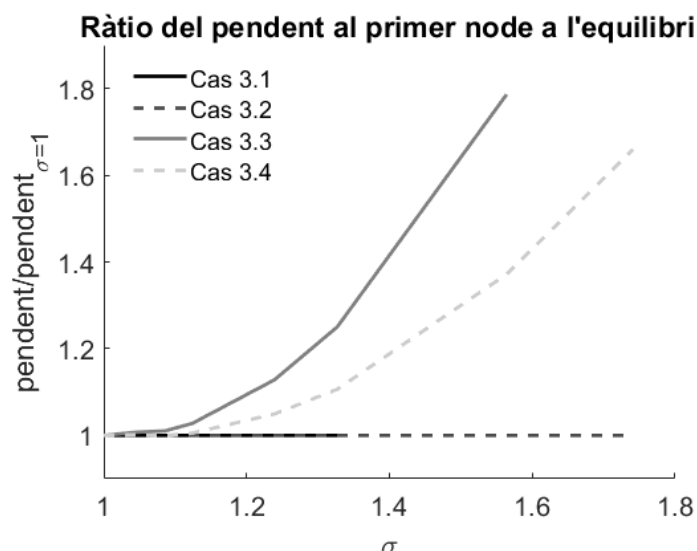


Figura 5-32: Ràtio del pendent del fons respecte el pendent del fons quan $\sigma=1$ a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica.

Si analitzem el pendent pels casos on la secció és rectangular i el sediment té una desviació geomètrica igual a la unitat, podem observar que la situació a l'equilibri és completament diferent en els dos casos (Figura 5-31). En el cas 3.3, on el cabal sòlid d'entrada és inferior al de capacitat del 1r node, el pendent del fons és més petit que l'inicial ja que ha de disminuir el pendent del fons per reduir la seva capacitat de transport (apartat 4.1.3). Aquesta situació es trenca quan es cuirassa la llera, ja que els diàmetres de la capa activa són majors i costen més de transportar (es raonarà més endavant a l'explicar les tensions de fons). Com a conseqüència, el riu augmenta el pendent per augmentar la seva capacitat de transport (apartat 4.1.3). Per altra banda, el cas 3.4, on el cabal sòlid d'alimentació és superior al de capacitat del primer node, el pendent ha d'augmentar respecte l'inicial per poder transportar el que li entra i arribar a l'equilibri (apartat 4.1.3). Aquesta situació s'accentua quan major és la desviació geomètrica de la granulometria, ja que la llera es cuirassa. Com s'ha explicat en el cas 3.3, el riu ha d'augmentar més el pendent per poder transportar els diàmetres majors.

Comparant el pendent adimensional del fons pel cas 3.3 i el cas 3.4 (Figura 5-32) podem veure que l'augment de pendent del fons és menor quan el cabal sòlid d'entrada és superior al de la capacitat del primer node, ja que la llera es cuirassa menys (Figura 5-29) i per tant no necessita augmentar tant el pendent per poder assolir l'equilibri (igualar el cabal sòlid d'entrada i el de capacitat).

En els casos de la secció composta, el pendent dels nodes on es produeix el règim uniforme és el pendent inicial en tots dos casos i per totes les simulacions. Pel que s'ha explicat a l'apartat 5.2 el riu intenta arribar a l'equilibri només variant el calat i la cota de fons, mantenint el pendent igual a l'inicial. Els nodes més propers a la condició de contorn aigües avall tenen un pendent major i no es manté constant el cabal unitari que passa per les planes i per la llera (veure Figura 5-26). Tant en el cas 3.1 com en el cas 3.2, com major sigui la desviació geomètrica, menor pendent tenen els últims nodes. Comparativament entre els

dos casos, el cas 3.1 té un pendent del fons major, però per assolir l'equilibri necessita unes tensions de fons menors a les del cas 3.2, això ho aconsegueix amb més profunditat de la llera i amb un pendent motriu menor (menys calat, menys tensió de fons).

La Figura 5-33, mostra la variació mitjana de tots els nodes.

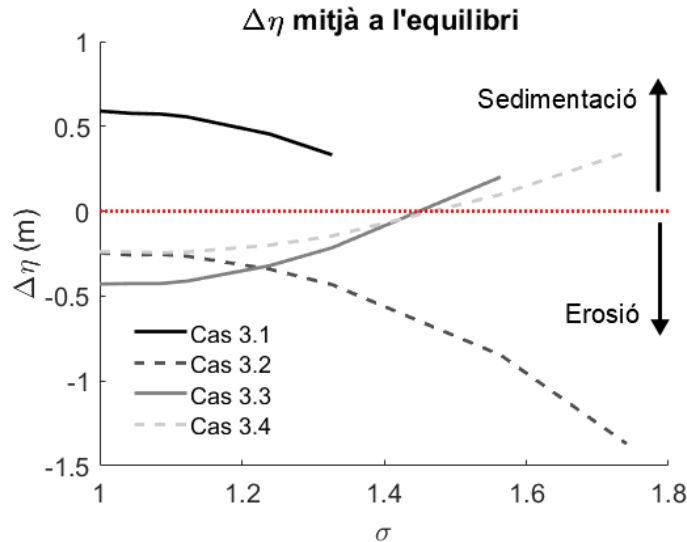


Figura 5-33: Increment de cota del fons a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica. La línia vermella puntejada indica la frontera entre l'erosió i la sedimentació.

En els casos 3.3 i 3.4 amb sigma unitària, el fet que erosioni material de mitjana o en el primer node és degut a la condició d'aigües avall. A l'imposar una cota d'aigua el riu varia la cota del fons per trobar l'equilibri. L'evolució produïda a l'augmentar la desviació geomètrica de la granulometria ve condicionada pel cabal sòlid d'entrada. Es pot veure com cada cop hi ha menys erosió (valors negatius) i que acaba sent acumulació de sediment (valors positius). La situació al primer node és més exagerada ja que està condicionada pel pendent. Com major pendent hagi d'aconseguir el riu, major serà l'increment de cota del primer node. Quan el cabal sòlid és inferior a la capacitat del primer node (cas 3.3) hi ha més variació, tant en un cas com en l'altre.

Els casos 3.1 i 3.2, com els anteriors, els valors d'erosió o sedimentació depenen del cabal sòlid d'entrada (en aquest cas, contràriament al que sembla lògic en llera rectangular, a major cabal sòlid d'entrada, cas 3.2, més erosió, tant en el primer node com de mitjana; el cas 3.1 on el cabal és inferior, l'esperable seria que hi hagués erosió, doncs per contra hi ha acumulació de sediment). Aquestes situacions ja s'han detectat a l'apartat 5.2 i s'han justificat. En tots dos casos la tendència de la variació de la cota de fons és a la baixa, de manera que com major sigui la desviació geomètrica de la granulometria, major erosió (o menor acumulació en el cas 3.1). Sembla que els canvis són lleugerament més exagerats en el cas 3.1, on el cabal sòlid és inferior, això seria coherent amb el raonament emprat en llera rectangular.

Dels resultats anteriors podem observar que el cas 3.2 té erosions compreses dins l'interval de 0,40 m i 0,80 m, en aquest interval és quan el calat crític pot

presentar més d'una solució (veure l'apartat 4.3.3). Però en aquestes situacions el calat crític no es calcula ja que el número de Froude és inferior a 0,7, valor a partir del que s'imposa el calat crític al model. A la Figura 5-39 es pot veure com el calat augmenta amb la desviació geomètrica de la granulometria i el número de Froude té la tendència inversa, de manera que quan hi ha erosions crítiques el número de Froude és baix.

La Figura 5-34 mostra les tensions de fons en situació d'equilibri, fetes adimensionals respecte el valor inicial en el primer node. La Figura 5-35 mostra també les tensions de fons en situació d'equilibri però adimensionals respecte el valor de sigma 1; al tractar-se de la situació d'equilibri, el gràfic és vàlid per qualsevol dels nodes, ja que la tensió de fons és la mateixa, com s'ha explicat a la Figura 5-28.

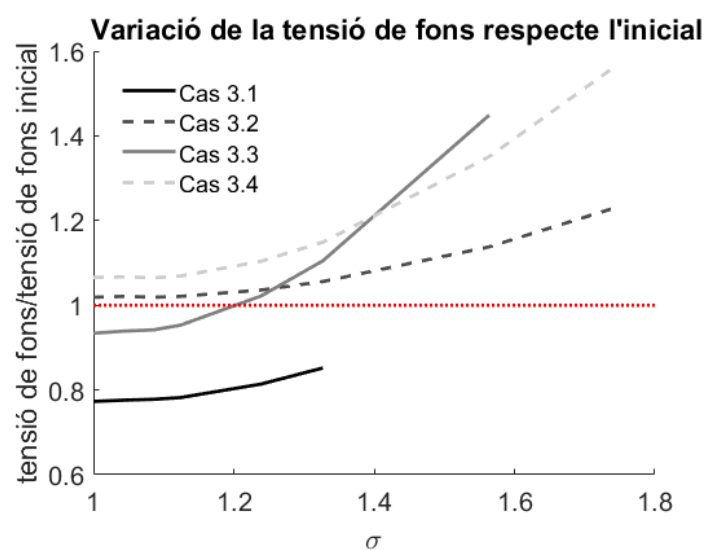


Figura 5-34: Variació de la tensió del fons a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica. La línia vermella puntejada indica la situació inicial.

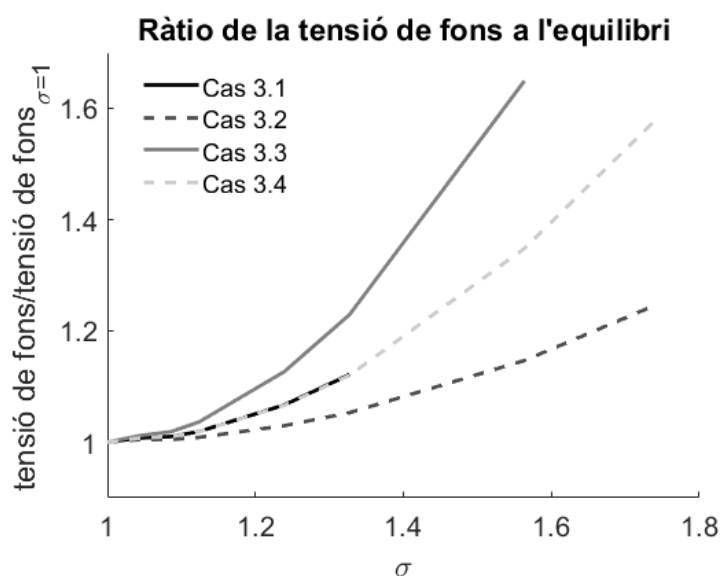


Figura 5-35: Ràtio de la tensió del fons respecte la tensió del fons quan $\sigma=1$ a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica.

Quan la desviació geomètrica és unitària, les tensions de fons d'equilibri són menors que les que tenia inicialment el primer node pel cas 3.3; ja que ha de reduir la capacitat de transport per poder arribar a l'equilibri i poder transportar el material que li entra, ni més ni menys. Per altra banda, el cas 3.4 és a l'inrevés, li entra més material del que pot transportar, per tant les tensions a l'equilibri seran majors a les inicials per poder transportar més material.

A mesura que augmenta la desviació geomètrica de la granulometria, les tensions augmenten. Degut a aquest augment de la desviació geomètrica, com s'ha dit abans, provoca una cuirassa per això arriba un moment on les tensions de fons del cas 3.4 superin les inicials.

Analitzant la Figura 5-35 es pot veure clarament que a l'augmentar la desviació geomètrica de la granulometria, les tensions de fons augmenten, ja que per mantenir el cabal sòlid es necessita augmentar la tensió de fons per poder moure el material cuirassat (recordem que com major desviació geomètrica, major diàmetre de la cuirassa).

En el cas 3.3, on el cabal sòlid d'alimentació és inferior al de capacitat, les tensions de fons augmenten més que al cas 3.4. Aquest fet és degut al major diàmetre de la cuirassa, com major sigui, es necessiten majors tensions de fons per mantenir el mateix cabal sòlid.

En els casos de secció composta la situació és similar a la dels que presenten secció rectangular. Les tensions de fons han d'augmentar a mesura que augmenta la desviació geomètrica per poder transportar el material més groller. I aquest augment és més accentuat en el cas 3.1 que en el cas 3.2 ja que el diàmetre de la cuirassa és major (Figura 5-30). En la situació de taus unitàries, el raonament també és vàlid el de la llera rectangular.

Comparant els casos amb llera rectangular i composta, es pot veure que les tensions fetes adimensionals amb les tensions quan la desviació geomètrica és 1 pel cas 3.1 i el cas 3.3 són iguals, això és degut a que el cabal sòlid d'entrada és igual en tots dos casos.

L'explicació dels casos 3.1 y 3.2 és anàloga a la del cas 3.3 y 3.4 respectivament.

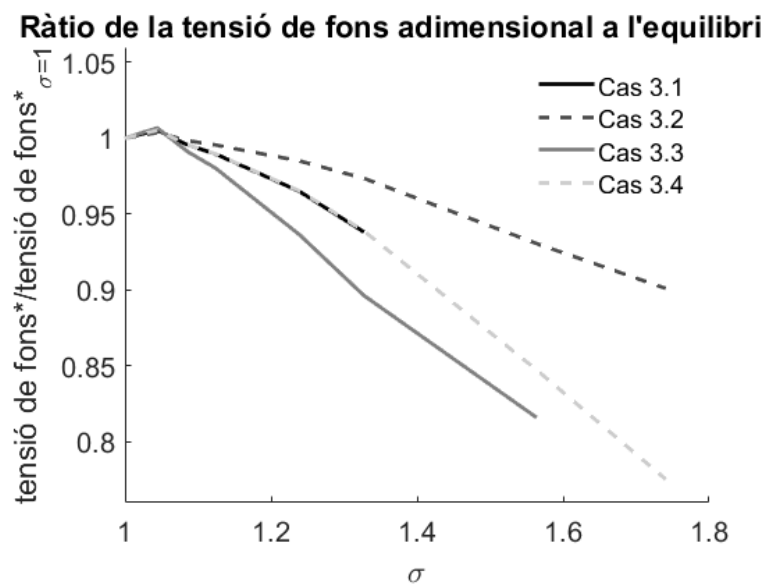


Figura 5-36: Ràtio de la tensió del fons adimensional respecte la tensió del fons adimensional quan $\sigma=1$ a l'equilibri dels 4 casos en funció de la desviació geomètrica.

Les tensions adimensionals (Figura 5-36) tenen una tendència a la baixa respecte l'augment de la desviació geomètrica. La tendència és a l'invers de la de les tensions de fons presentades prèviament. Això és degut a la definició de la tensió adimensional(23), per obtenir-la s'ha de dividir la tensió de fons pel diàmetre D_{50} , entre altres coses. Com s'ha vist a la Figura 5-29 el diàmetre augmenta més del doble, mentre que les tensions no arriben a augmentar al doble. Això provoca que les tensions de fons adimensionals disminueixin amb l'augment de la desviació geomètrica de la granulometria, és a dir, que segueixen la tendència inversa del diàmetre.

El número de Froude està relacionat amb el calat. En llera rectangular el número de Froude és proporcional al calat elevat a la menys tres mitjos. Per tant, en aquest cas, la tendència del número de Froude serà inversa a la del calat i més exagerada. Conseqüentment analitzarem l'evolució del calat:

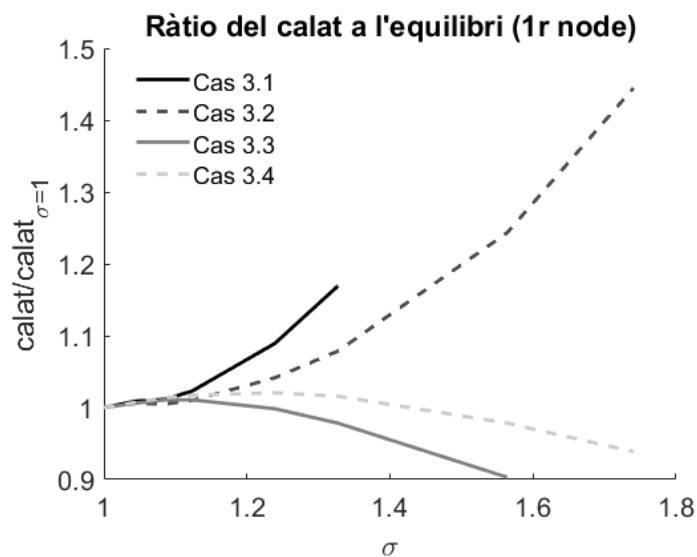


Figura 5-37: Ràtio de la tensió del calat respecte el calat quan $\sigma=1$ a l'equilibri dels 4 casos al primer node en funció de la desviació geomètrica.

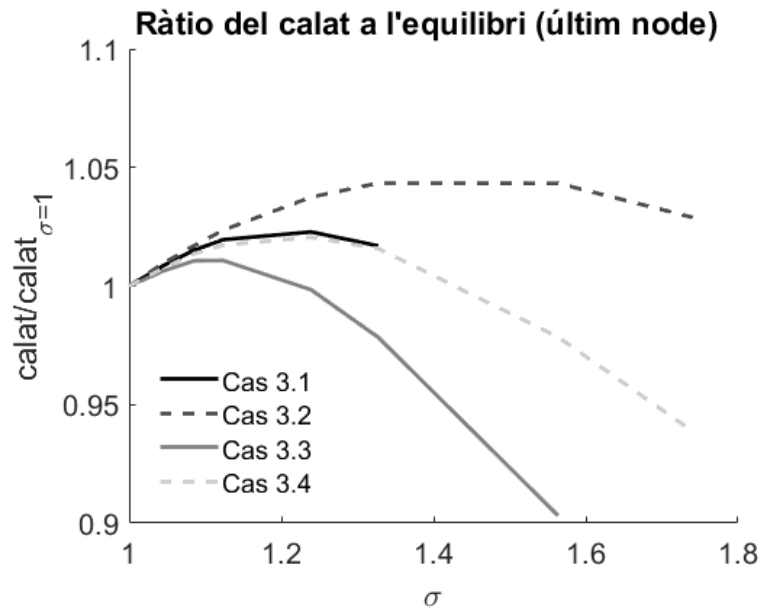


Figura 5-38: Ràtio de la tensió del calat respecte el calat quan $\sigma=1$ dels 4 casos a l'últim node en funció de la desviació geomètrica.

Primer analitzarem els casos 3.3 i 3.4 (llera rectangular). Agafant l'equació de Manning com a referència i fent la relació entre dos cabals iguals obtenim la següent relació de calats (fent la simplificació que el radi hidràulic és igual al calat i introduint la definició del coeficient de Manning):

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{3/10} \left(\frac{D_{90_2}}{D_{90_1}}\right)^{1/10} \quad (30)$$

D'aquí obtenim que el calat augmentarà perquè el D_{90} augmenta (Figura 5-30), però arriba un moment que el pendent (S) augmenta tant (Figura 5-32) que per molt que el D_{90} segueixi augmentant el calat disminuirà (canvi de pendent de la Figura 5-37 i la Figura 5-38). Aquesta variació de tendència anirà controlada per la següent relació, entenent els índex com dos valors consecutius del gràfic:

$$\begin{aligned} \text{si } \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3 &< \frac{D_{90_2}}{D_{90_1}}; \text{ augmenta el calat} \\ \text{si } \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3 &> \frac{D_{90_2}}{D_{90_1}}; \text{ disminueix el calat} \end{aligned} \quad (31)$$

Si considerem el subíndex 1 com el valor en sigma igual a 1,00, obtenim que el canvi de positiu a negatiu del calat (Figura 5-37 i Figura 5-38) es produirà quan:

$$\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^3 = \frac{D_{90_2}}{D_{90_1}} \quad (32)$$

Entre els dos casos de secció rectangular, s'observa que el cas 3.4, on el cabal sòlid d'alimentació és major al de capacitat del primer node, tarda més a produir-se el canvi perquè el pendent augmenta més lentament. El D_{90} també disminueix menys, però no és tant significatiu.

En el cas 3.1 i el cas 3.2 el calat al primer node augmenta amb la desviació geomètrica. Això és degut a que les tensions de fons per assolir l'equilibri són cada cop majors com s'ha raonat anteriorment (veure Figura 5-35). Com s'ha explicat en l'apartat 5.2 les tensions de fons augmenten degut a l'augment del calat, és per això que el calat augmenta, per poder assolir les tensions de fons d'equilibri. Per altra banda l'augment també està relacionat amb l'augment del D_{90} amb la desviació geomètrica, ja que el pendent és constant en el primer node.

El calat del cas 3.1 augmenta més ràpidament que el cas 3.2 pel mateix motiu que les tensions de fons augmenten més ràpidament.

Pel que fa al calat a l'últim node de la secció composta, el comportament és similar al de la secció rectangular, ja que també hi ha canvi de pendent del fons i és aquest el que controla la tendència de les tensions de fons, a partir de cert punt, com ne la secció rectangular. El raonament dels casos en secció rectangular (cas 3.3 i cas 3.4) és aplicable als casos de secció composta (cas 3.1 i cas 3.2).

En el cas de la desviació geomètrica unitària, on la granulometria és igual per a tots, el comportament està controlat per la balança de Lane.

En secció rectangular, com major el cabal sòlid d'entrada, menor calat per assolir el transport d'equilibri, ja que és necessita un major pendent. I com menys cabal sòlid d'entrada, major calat per assolir el transport d'equilibri i menor pendent.

Als primers nodes en secció composta, es necessita més calat per tenir unes tensions de fons majors i aconseguir el transport de fons que entra (raonament més detallat a l'apartat 5.2).

A l'últim node en secció composta, la situació és diferent ja que també entra en joc el pendent del fons que és variable.

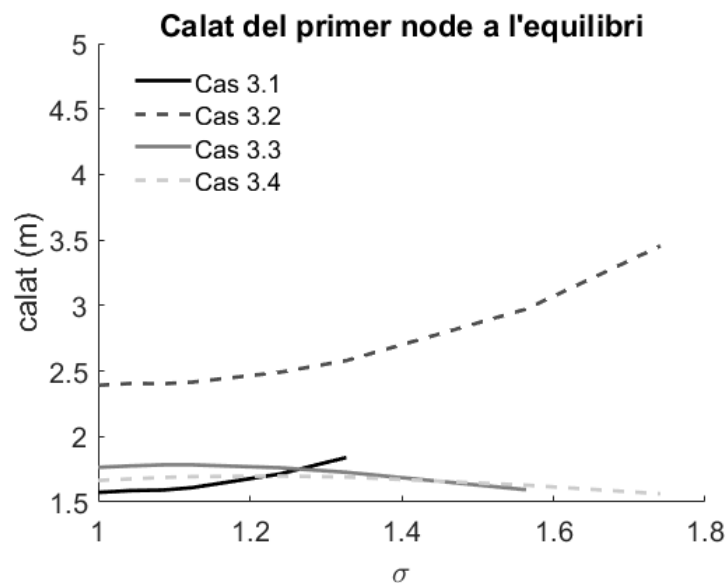


Figura 5-39: Calat a l'equilibri dels 4 casos al primer node en funció de la desviació geomètrica.

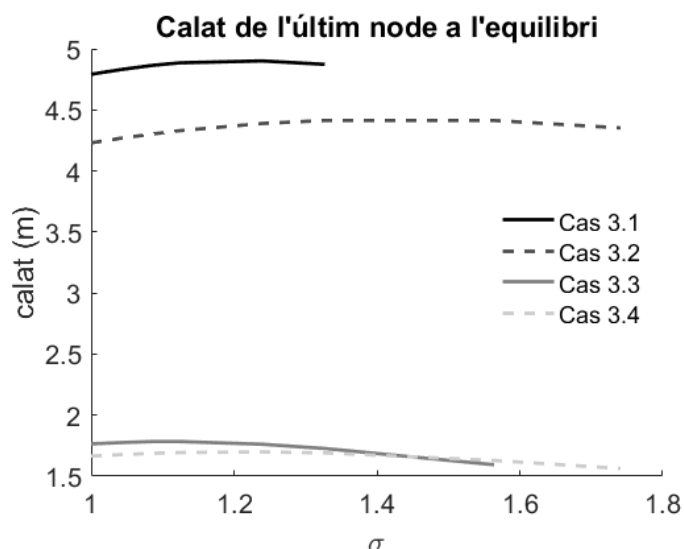


Figura 5-40: Calat a l'equilibri dels 4 casos a l'últim node en funció de la desviació geomètrica.

Com s'ha dit abans el número de Froude tindrà la tendència inversa al calat. Per tant quan el calat augmenti el número de Froude disminuirà i a l'invers.

5.4.Cas d'estudi

A continuació es presenten els resultats del cas d'estudi. L'apartat s'ha desglossat en tres apartats.

El primer inclou un anàlisi de les condicions de contorn implementades al model.

El segon apartat presenta els resultats obtinguts amb el model del treball aplicant les condicions de contorn presentades al subapartat previ.

Per últim hi ha un apartat on es resumeixen els resultats obtinguts amb el model realitzat en aquest treball.

5.4.1. Anàlisi de les condicions de contorn

A continuació es presenta el tractament de dades que s'ha fet de les condicions de contorn abans d'introduir-les com a tal al model. Per resumir es presentaran únicament el tractament realitzat al cabal líquid i el calat aigües amunt de la bifurcació.

A la Figura 5-41 es mostra l'evolució del cabal líquid que passa pel canal en funció del cabal total del riu. En color negre està el resultat obtingut directament del càlcul realitzat amb HEC-RAS. Es pot apreciar que la funció que relaciona els dos cabals no és monòtona creixent, això és degut al fet que a l'HEC-RAS s'ha introduït la geometria obtinguda dels MDT sense simplificar; és a dir, que degut a la casuística de la geometria, es dona el cas que tot i augmentar al cabal líquid total del riu, el cabal que entra pel canal no augmenta o fins i tot disminueix.

Entrant en més detall, aquest fet es produeix, entre d'altres, per l'existència d'una llera abandonada situada al marge esquerra del canal auxiliar. Segons el calat d'aigua aquesta llera s'omple o no s'omple i això fa que a la que s'ompli el calat global disminueixi, per tant redistribueix els cabals de manera que es conservi l'energia en els dos braços, de tal manera que la solució dóna lloc a un cabal inferior pel canal auxiliar.

Com el model que s'ha realitzat en aquest treball té la geometria simplificada, s'ha optat per simplificar també les condicions de contorn, de manera que s'ha convertit en monòtona creixent (color gris).

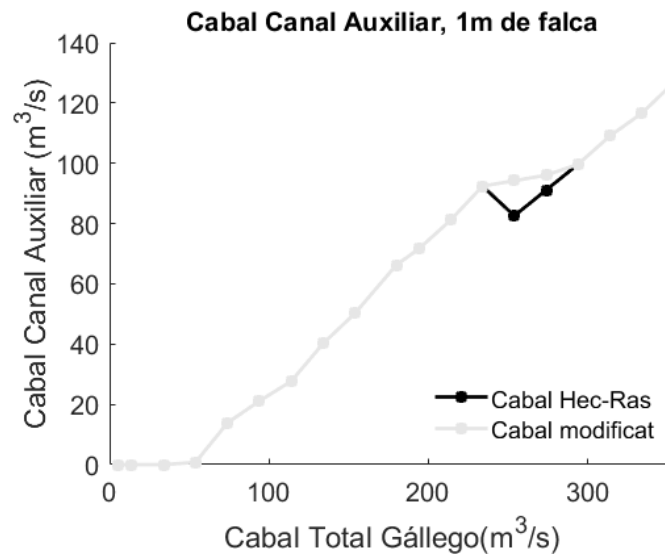


Figura 5-41: Comparació entre el cabal resultant del HEC-RAS (color negre) i el cabal modificat (color gris) pel cas d'1m de falca de sediment.

El mateix passa amb el calat, com es veu a la Figura 5-42. La funció no és monòtona creixent (color negre) i s'ha modificat de manera que ho sigui (color gris) per coherència amb la geometria del model del treball.

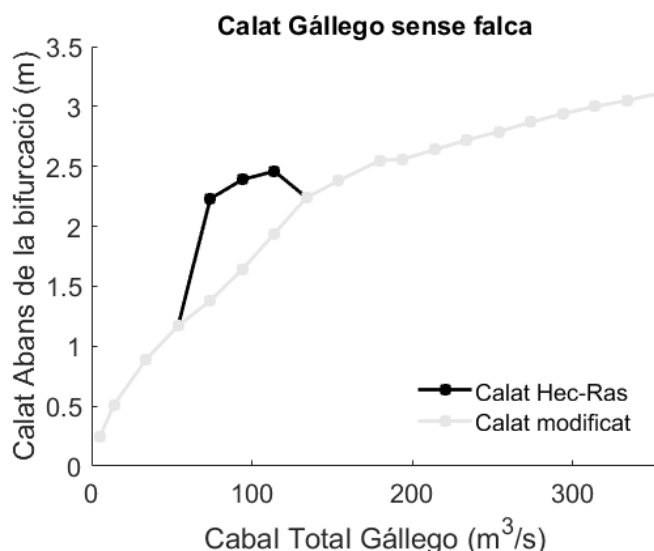


Figura 5-42: Comparació entre el calat resultant del HEC-RAS a la secció aigües amunt de la bifurcació (color negre) i el calat modificat (color gris) pel cas sense falca de sediment.

El cabal sòlid del riu així com el cabal sòlid del canal auxiliar tenen la mateixa tendència que el calat aigües amunt de la bifurcació ja que en aquest cas la magnitud del cabal sòlid només depèn del calat aigües amunt de la bifurcació perquè el pendent transversal de la secció aigües amunt de la bifurcació és zero (veure l'Annex C). Com a conseqüència s'ha fet la mateixa modificació al cabal sòlid que la realitzada al calat: convertir la funció a monòtona creixent.

A continuació s'analitza la variació de les condicions de contorn en funció de les diferents falques de sediment analitzades; s'agafa de cas base el càlcul sense sediment al canal auxiliar.

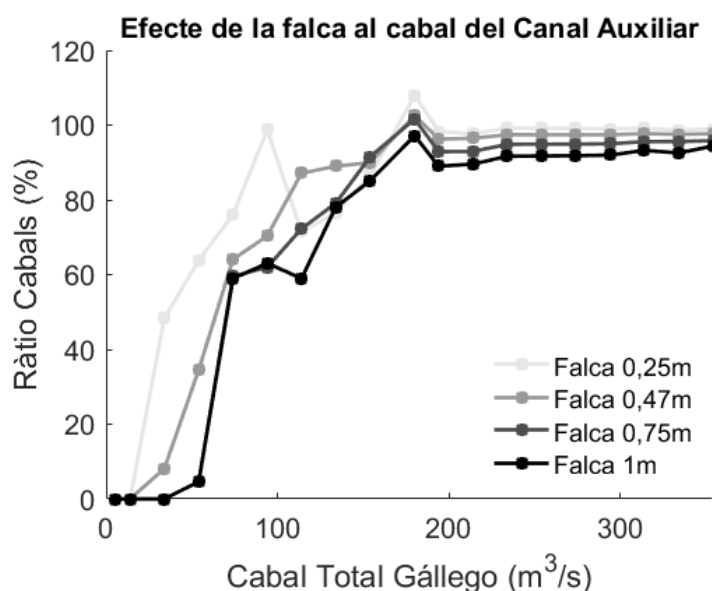


Figura 5-43: Efecte de la falca a la magnitud del cabal del canal auxiliar en funció del cabal total del riu Gállego. El 100% indica que la falca no té efecte. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

A la Figura 5-43 es pot veure que l'existència de la falca fa reduir el cabal que passa pel canal auxiliar. Per cabals inferiors a $180\text{m}^3/\text{s}$ hi ha un clar efecte de la falca, però la reducció del cabal no és proporcional a la falca, degut a les variacions de la geometria. El que és interessant destacar és la gran reducció del cabal. Pels cabals més petits deixa de passar cabal pel canal auxiliar a l'haver-hi la falca (0%).

L'efecte de la magnitud de la falca és veu més clarament per cabals elevats del riu (majors a $180\text{m}^3/\text{s}$) ja que no afecta tant la geometria i la reducció es manté més o menys constant independentment del cabal del riu. Com major sigui la falca menys aigua passa pel canal auxiliar.

El comportament del cabal amb la naturalesa de la falca és lògic en el sentit que si la secció s'ha omplert té menys capacitat, per tant hi passarà menys aigua i aquesta passarà pel riu.

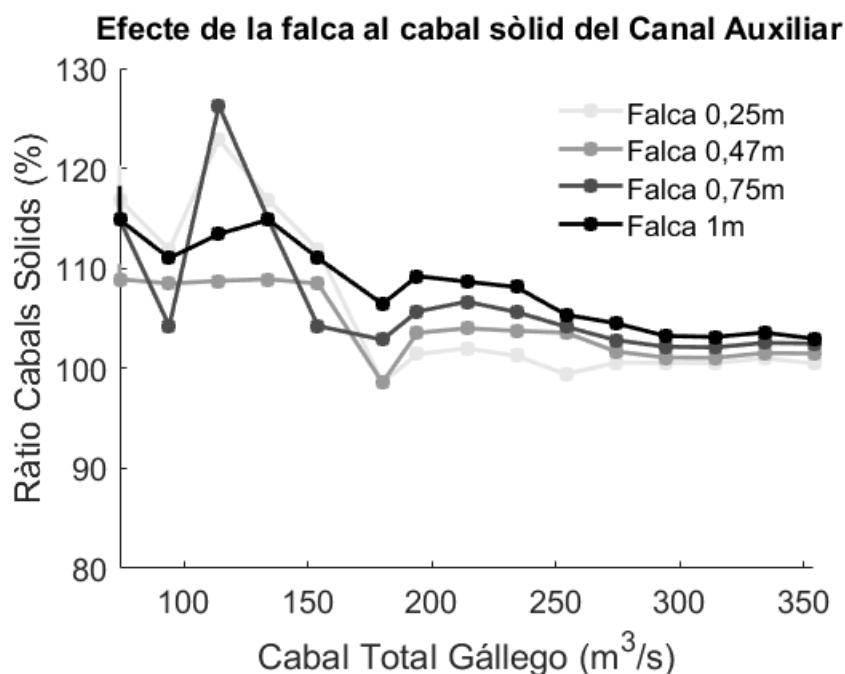


Figura 5-44: Efecte de la falca a la magnitud del cabal sòlid del canal auxiliar en funció del cabal total del riu Gállego. Valors més grans al 100% indica que el valor és major amb falca que sense i el 100% indica que la falca no té efecte. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

Ala Figura 5-44 es pot veure com l'existència de la falca fa augmentar considerablement el cabal sòlid que és subministrat al canal auxiliar. Per cabals inferiors a $180\text{m}^3/\text{s}$ hi ha un clar efecte de la falca, però l'augment del cabal sòlid no és proporcional a la falca, degut a les variacions de la geometria. El que és interessant destacar és el gran augment del cabal, sobretot pel cabal de $54\text{m}^3/\text{s}$ on l'augment és superior a deu vegades i per claredat d la figura no s'ha representat. Aquest fet es relaciona amb la geometria irregular introduïda al model d'HEC-RAS.

L'efecte de la magnitud de la falca és veu més clarament per cabals elevats del riu (majors a $180\text{m}^3/\text{s}$) ja que no afecta tant la geometria. Com major sigui la falca

de sediment acumulat al canal auxiliar, major és el subministrament de cabal sòlid al canal auxiliar.

El comportament del cabal sòlid amb la naturalesa de la falca està relacionat amb el calat aigües amunt de la bifurcació per la definició de la relació nodal (veure l'Annex D), el qual serà més gran com major sigui la falca, ja que la falca redueix la secció total, de manera que fa pujar el nivell d'aigua aigües amunt de la bifurcació.

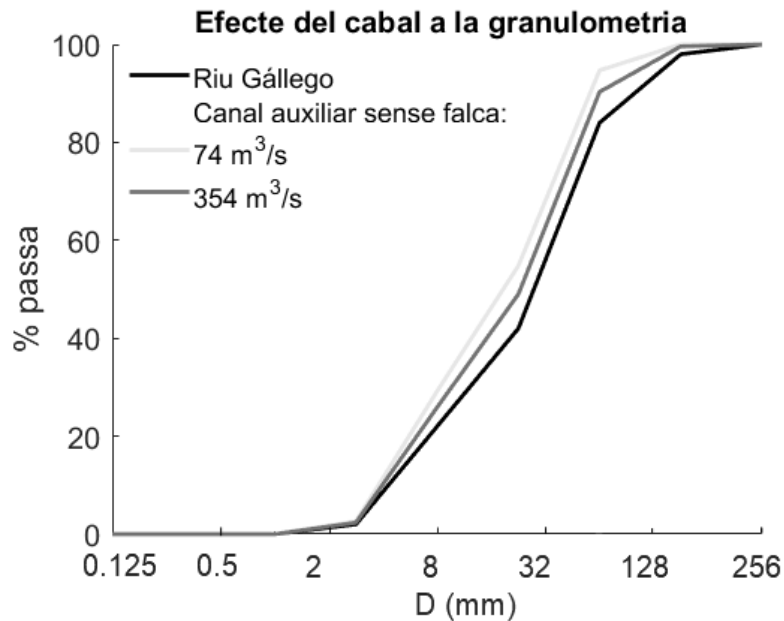


Figura 5-45: Efecte del cabal a la distribució granulomètrica del material d'alimentació del transport de fons del canal auxiliar quan no hi ha falca de sediment per un cabal total de 74 m³/s (color gris clar) i pel de 354 m³/s (color gris fosc). Es compara amb la granulometria del material de la llera (color negre).

Si entrem en més detall i analitzem la granulometria del material d'alimentació del transport de fons podem veure a la Figura 5-45 que és més fina que el material de la superfície i que varia en funció del cabal líquid. Com menys cabal, el material transportat és més fi, ja té menys capacitat de transportar el material més groller. En canvi a mesura que augmenta el cabal, té més capacitat de transport i pot transportar partícules més grolles.

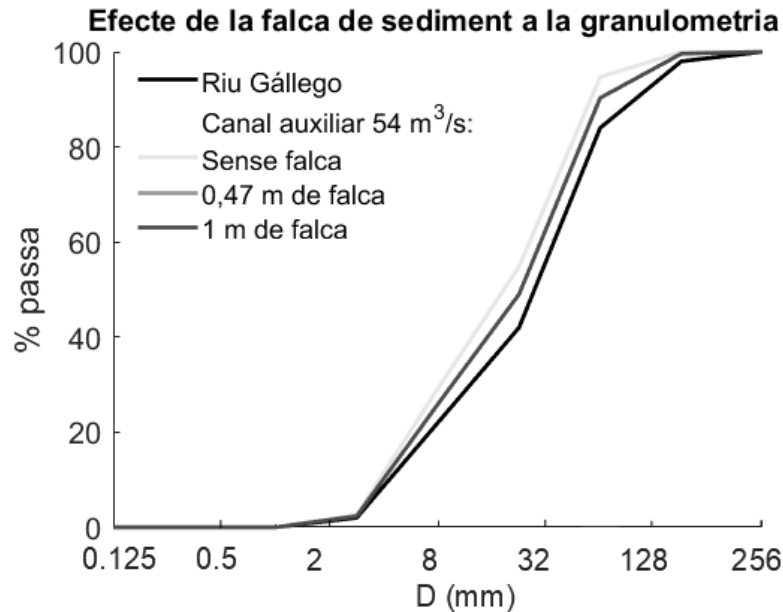


Figura 5-46: Efecte de la falca de sediment a la distribució granulomètrica del transport de fons del canal auxiliar per un cabal de 54 m³/s, com més clar el color de la línia menor és la falca de sediment considerada. Es compara amb la granulometria del material de la llera (color negre).

Per que fa a l'efecte de la falca en la granulometria aquest és menor i gairebé imperceptible en cabals grans, però pel cabal de 54 m³/s es pot veure a la Figura 5-46 com a l'augmentar la falca la granulometria del transport és més grollera. Això és degut al fet que al no tenir pendent transversal la secció agües amunt de la bifurcació la granulometria del riu i la dels dos braços és la mateixa, segons el que s'obté de la relació nodal (veure l'Annex D). És a dir, que la granulometria del transport de fons que entra al canal auxiliar ve donada en part per les tensions de fons d'aigües amunt de la bifurcació i aquestes són majors com major sigui el calat en aquell punt i pel que hem dit abans el calat és major quan major és la falca. És per això que com major sigui la falca més capacitat de transport té i per tant pot transportar material més groller.

A continuació s'analitza el comportament del calat a la última secció del canal auxiliar, el qual s'utilitzarà com a condició de contorn aigües avall del model.

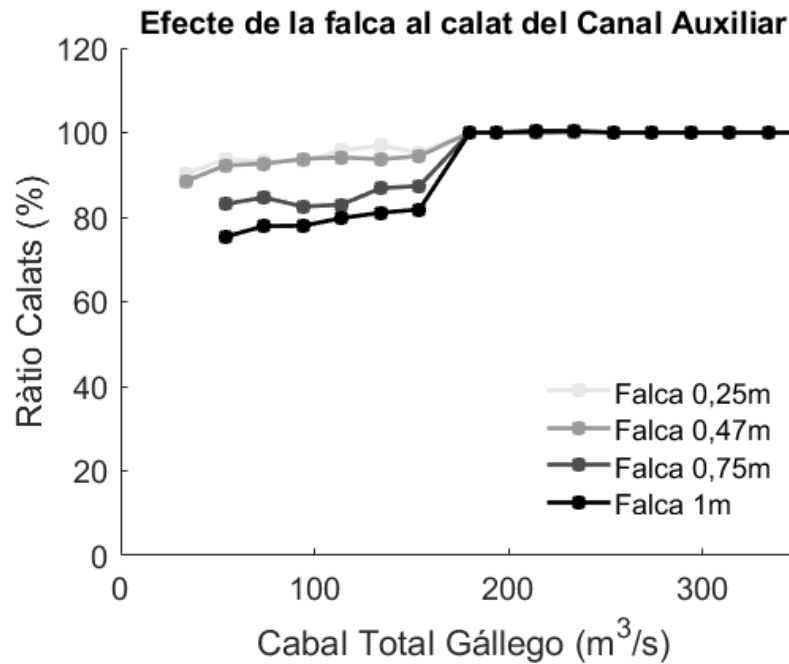


Figura 5-47: Efecte de la falca a la magnitud del calat a l'extrem inferior del canal auxiliar en funció del cabal total del riu Gállego. El 100% indica que la falca no té efecte. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

A la Figura 5-47 es pot veure com l'existència de la falca fa disminuir el calat a la última secció del canal. Com major és la falca menor és el calat aigües avall del canal auxiliar, ja que entra menys aigua. S'ha de destacar que els calats que no tenen valors és perquè no passa cabal pel canal auxiliar.

Per cabals elevats majors a 180 m³/s la falca no té efecte (ràtio del 100%), és a dir que independentment de la falca a la última secció sempre hi haurà el mateix calat.

A continuació es presenten les dades que s'introdueixen al model que després en funció de la falca escollirà una o una altra o farà una interpolació lineal.

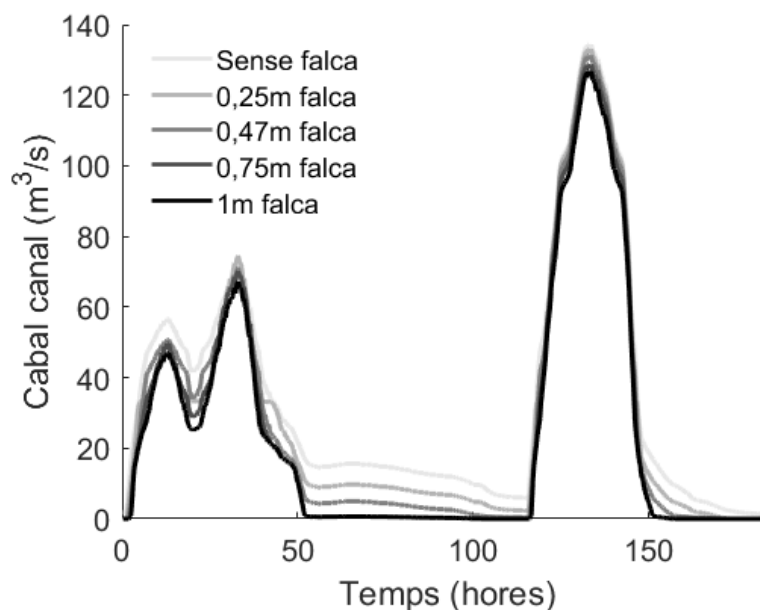


Figura 5-48: Hidrograma dels cabals del canal auxiliar que s'introdueix com a dada per obtenir la condició de contorn aigües amunt. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

La Figura 5-48 mostra l'hidrograma d'entrada per les diferents falques de sediment considerades. Es pot apreciar la tendència explicada anteriorment: com major és la falca menys cabal passa pel canal.

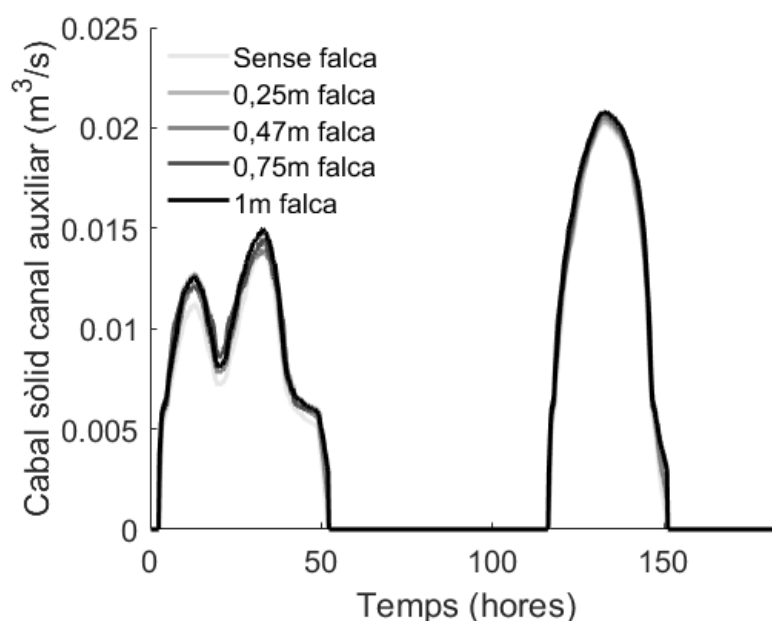


Figura 5-49: Hidrograma dels cabals del transport de fons del canal auxiliar que s'introdueix com a dada per obtenir la condició de contorn aigües amunt. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

La Figura 5-49 mostra l'hidrograma del cabal sòlid d'entrada per les diferents falques de sediment considerades. Es pot apreciar la tendència explicada anteriorment, que com major és la falca més cabal sòlid passa pel canal. Destacar que per cabals baixos no hi ha transport de fons i per tant no entra sediment per molt que sí que hi hagi cabal pel canal auxiliar.

No només s'ha introduït el valor absolut de cabal sòlid, sinó que també s'ha introduït la distribució granulomètrica corresponent a cada cabal i a cada falca, els valors es poden consultar a l'Annex B.

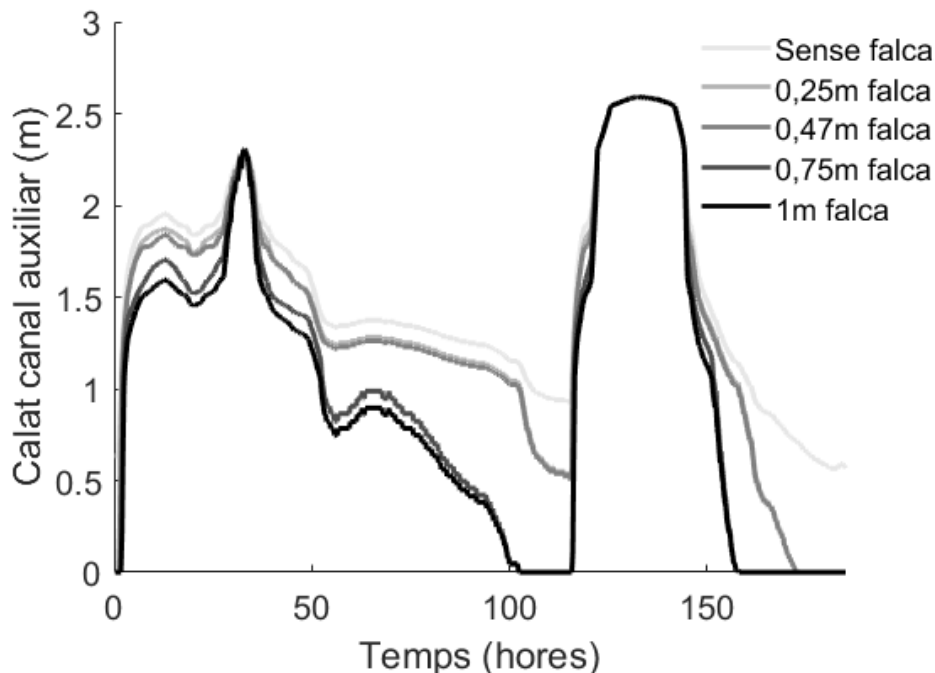


Figura 5-50: Dades de calat per obtenir la condició de contorn aigües avall. Com més fosca és la línia major és la falca de sediment.

La Figura 5-50 mostra les dades d'entrada de calat per les diferents falques de sediment considerades que serviran per definir la condició de contorn aigües avall. Es pot apreciar la tendència explicada anteriorment, que com major és la falca menys calat hi ha aigües avall del canal auxiliar, ja que no entra tant de cabal. Destacar que pels valors més alts de l'hidrograma del febrer i del novembre el calat és independentment de la falca, com s'ha pogut veure anteriorment.

5.4.2. Resultats

Degut a la pròpia naturalesa del model, s'ha aturat el càlcul quan qualsevol dels nodes es colga completament, ja que el model no considera el cas en que el sediment comença a ocupar les planes.

A l'instant final de càlcul el perfil de la llera i de la làmina d'aigua és el següent:

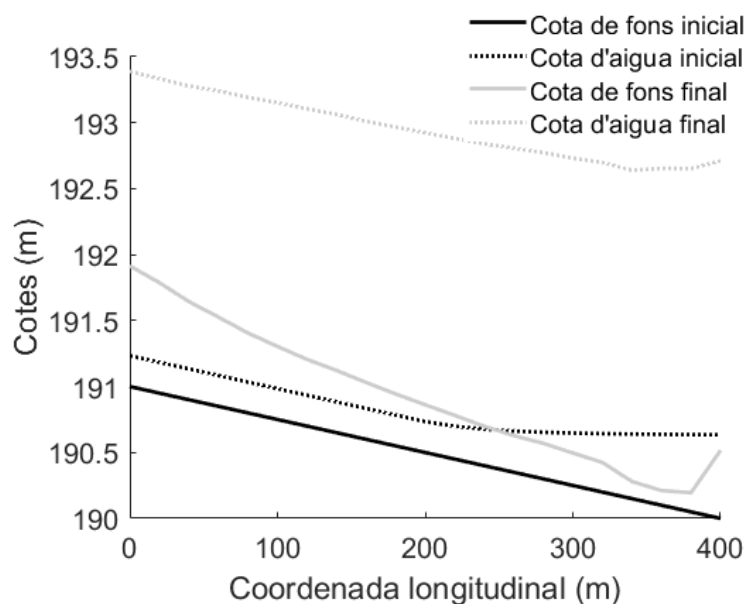


Figura 5-51: Perfil longitudinal final de color gris i en negre la situació inicial. En línia contínua apareix representat el fons de la llera principal i amb línia puntejada la làmina d'aigua.

A la Figura 5-51 es pot veure com el canal auxiliar ha patit acumulació de sediment majoritàriament en forma de falca, és a dir que s'ha acumulat més material aigües amunt que aigües avall. Tot i això, aigües avall també presenta acumulació de material i això és degut a la condició de contorn de l'extrem inferior. En aquest instant de temps s'aprecia molt bé que la làmina d'aigua forma una M1 i per tant això afavoreix la sedimentació. A l'apartat 5.4.3 s'analitzarà més el resultat obtingut i la correspondència amb la situació real.

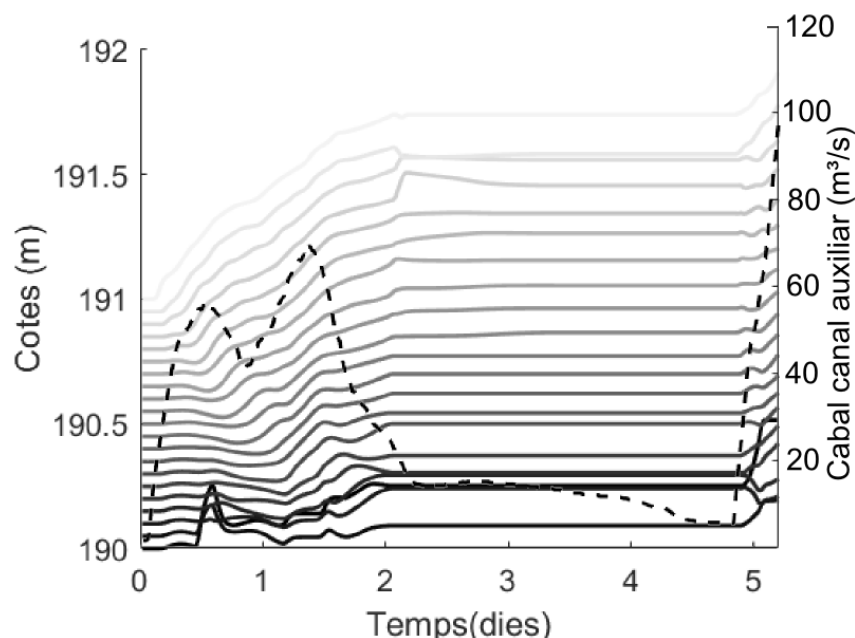


Figura 5-52: Evolució temporal de la cota del fons de la llera dels diferents nodes, com més fosca és la línia més aigües avall està el node, superposada amb l'hidrograma en línia discontinua.

A la Figura 5-52 es mostra l'evolució temporal de les cotes del fons pels diferents nodes al llarg del tram d'estudi. Es pot apreciar com inicialment no hi ha moviment del fons i que aquest es va produint des d'aigües amunt a aigües avall degut al cabal sòlid que entra, el qual és major a la capacitat de transport de la llera.

A continuació hi ha un període on les cotes es mantenen constants, aquest període correspon als cabals baixos on no hi ha ni prou capacitat de transport com per moure el material ni excés de cabal sòlid d'entrada com per sedimentar.

És interessant observar com no s'han produït erosions, ni en la branca de pujada ni de baixada del primer hidrograma, per tant s'espera un comportament similar al que queda del segon hidrograma, és a dir que l'acumulació final seria molt més elevada del que es presenta a la Figura 5-51.

A continuació es presenten els resultats de la granulometria del fons:

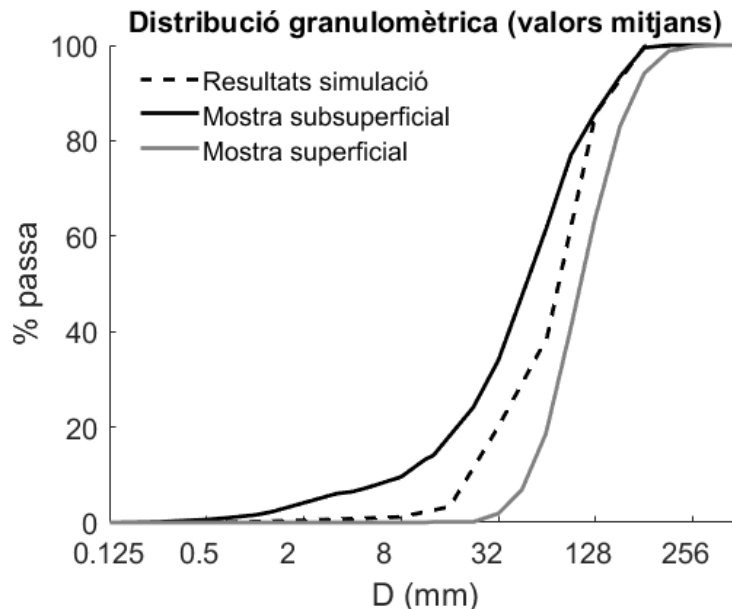


Figura 5-53: Distribució granulomètrica mitjana de les mostres superficials, subsuperficials i de la granulometria de la superfície del resultat de la simulació.

Els resultats de la granulometria a l'instant que s'ha aturat el càlcul no es poden comparar del tot amb les mostres granulomètriques superficials preses al camp, ja que encara no ha passat tot l'hidrograma i poden haver-hi canvis en la granulometria del material superficial degut a l'acumulació de més sediment.

Per altra banda tampoc són del tot comparables amb els valors obtinguts de les mostres subsuperficials (Figura 3-14) pel mateix motiu que les superficials, és a dir, que es pot acumular més material o erosionar i per tant el material subsuperficial es veurà sotmès a canvis.

És per això que a la Figura 5-53 es compara la mitjana de tots els nodes obtinguts amb la simulació (línia discontinua) amb les mitjanes de les mostres subsuperficials (línia contínua en negre) i superficials (línia contínua grisa).

Comparant les tres línies es pot veure com la del resultat de la simulació està compresa entre les altres dues, és a dir, que el material superficial ha tingut una tendència a tornar-se més groller. Aquesta tendència s'espera que es mantingui, ja que la simulació no ha acabat de reproduir tota la branca de pujada de la crescuda del novembre.

Entrant amb més de detall es pot veure com el material més fi ha desaparegut, ja que el material s'ha tornat més groller, com s'ha dit al paràgraf anterior. Per altra banda, els diàmetres més grans s'han mantingut més constants, ja que les fraccions més grolleres són més difícils de mobilitzar. Tot i així, la corba s'ha desplaçat una mica cap a la dreta (material més groller).

Cal recordar que la mitjana de les distribucions granulomètriques de les mostres subsuperficials és la que s'ha utilitzat com a condició inicial del material superficial i subsuperficial de la llera (tant planes d'inundació com llera principal).

A continuació es compara la mitjana obtinguda al llarg de tots els nodes de la granulometria del transport de fons amb la mitjana de les mostres granulomètriques preses, al marge esquerre i al centre del riu, per un cabal màxim total de 147 m³/s (Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017), el qual correspon aproximadament al cabal total en el moment d'aturar el càlcul.

També es van realitzar mesures al marge dret del riu, però durant un període de temps inferior al del marge esquerre i al del centre ja que hi havia poc transport i es van centrar els esforços als altres dos punts de mesura.

La granulometria del transport de fons del canal és comparable a la mesurada aigües amunt de la bifurcació en base als resultats obtinguts amb la relació nodal. Aquesta posa de manifest que degut a que no té pendent transversal el riu aigües de la bifurcació, la seva granulometria i la corresponent a cadascun dels dos braços és la mateixa.

Analitzant els resultats de la Figura 5-54 es pot veure com la granulometria del transport de fons resultant del càlcul està compresa entre els límits que li marca la granulometria mesurada del transport de fons del marge esquerre i el centre del riu. A excepció dels percentatges dels diàmetres més grossers, on el càlcul dona un material més fi que el mesurat.

També és interessant comparar el material transportat amb la granulometria del material d'alimentació i amb el material dipositat en superfície. De totes les distribucions granulomètriques la del material transportat és la que té una granulometria més fina com es pot veure comparant la Figura 5-54 amb la Figura 5-45 i la Figura 5-53; d'entre les dues restants, la del material d'alimentació és més fina que la del material superficial.

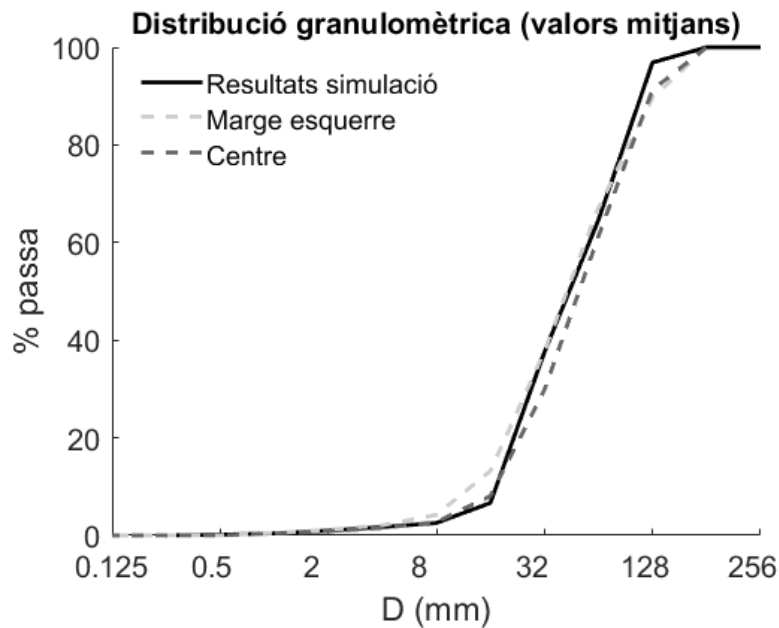


Figura 5-54: Distribució granulomètrica mitjana de les mostres preses amb el Helley-Smith al marge esquerre i al centre del riu conjuntament amb el resultat de la simulació.

5.4.3. Resum dels resultats

A continuació es fa un resum dels resultats obtinguts del model i a les observacions realitzades durant el procés de calibració del model.

L'acumulació observada en el perfil final (veure Figura 5-51) correspon a un volum de sediment de: 2400m³. Comparativament amb el volum acumulat que s'ha obtingut dels MDT representa només un 42%. S'ha de tenir en compte que el volum de sediment obtingut al model no correspon a l'instant final de l'hidrograma, sinó que és abans de la punta de l'hidrograma del novembre, per tant, encara es podria acumular més sediment augmentant el percentatge. Si es mira l'acumulació abans del segon hidrograma, aquesta representa un 36% del total mesurat al camp. Veient que amb els cabals del primer hidrograma, inferiors als del segon, s'ha acumulat un 36% és previsible que amb els cabals majors del segon hidrograma s'acumuli més

Els resultats presentats anteriorment s'han obtingut sense aplicar cap coeficient calibrador al cabal sòlid d'entrada i augmentant la condició de contorn aigües avall un 10% respecte el valor obtingut al HEC-RAS, ja que amb el calat obtingut de l'HEC-RAS s'obtenien erosions al tram final del canal auxiliar i a la realitat es va observar una acumulació de sediment generalitzada del canal auxiliar. És per això que s'ha incrementat la condició de contorn, per forçar la sedimentació.

A través de diferents simulacions s'ha conclòs que el model és més sensible a l'increment de la condició de contorn aigües avall que al cabal sòlid d'entrada.

També s'ha detectat la sensibilitat del model al coeficient de a_u (18):

Per valors d'aquest coeficient inferiors a 0,5, és a dir donant més pes a les condicions aigües amunt, els resultats temporals són més inestables presentant ondulacions tot i que analitzant el perfil en un instant de temps donat és més estable. S'entén com a resultats temporals l'evolució temporal d'alguna variable.

Per altra banda, quan el coeficient és major a 0,5 (donant més pes a les condicions d'aigües avall) es produeixen ondulacions espacialment, tot i que temporalment és més estable. Les ondulacions espacialment fan referència a les ondulacions que es produeixen en un instant de temps donat en els diferents nodes.

En la simulació del cas d'estudi s'ha utilitzat un coeficient a_u de 0,5.

Pel que fa als resultats de granulometria, aquests són satisfactoris ja que s'aconsegueix una granulometria més grollera que la que tenia inicialment el model i per tant és veu una tendència cap a la granulometria superficial.

6. Conclusions i Recomanacions

El treball ha permès simular el comportament morfodinàmic d'una llera amb planes d'inundació i avaluar-ne quin és l'efecte, així com la sensibilitat a la dispersió de la granulometria, tot en règim gradualment variat (i quasi permanent). Això era un repte, com ha demostrat el volum de feina necessari, tot i ser un model matemàtic unidimensional.

El model ha simulat correctament les situacions d'equilibri esperades en llera rectangular, de manera que és capaç de mantenir el règim uniforme i augmentar o disminuir el pendent en funció de les variacions del cabal sòlid d'entrada, així com erosionar-se o acumular material en funció de la condició de contorn aigües avall.

Pel que fa a la secció composta el model és capaç de simular correctament el règim uniforme. Per altra banda, modificant les condicions de contorn s'han obtinguts resultats que a primer cop d'ull sobten, però que després de raonar-los són coherents amb les hipòtesis realitzades. En els 4 casos en llera composta que no són el cas 2.0 s'obté un equilibri en gradualment variat.

L'efecte de la dispersió granulomètrica també ha sigut capaç de reproduir-lo satisfactòriament, com els casos anteriors. Cal destacar que a major dispersió, major és el diàmetre de la cuirassa que es forma (major rugositat) i a l'augmentar la rugositat això té les seves implicacions com l'augment de les tensions entre d'altres.

El model ha permès simular el cas del canal auxiliar construït al riu Gállego i s'han obtingut resultats similars a la realitat pel que fa a la granulometria, tot i que s'ha de destacar que no s'ha pogut simular el 100% de l'hidrograma previst per restriccions intrínseques del model, ja que el model no permet que s'acumuli més material del que hi cap a la llera principal. És per això que l'acumulació obtinguda es situa en un 42% del que es va produir. Si es mira l'acumulació abans del segon hidrograma, aquesta representa un 36% del total mesurat al camp. Veient que amb els cabals del primer hidrograma, inferiors als del segon, s'ha acumulat un 36% és previsible que amb els cabals majors del segon hidrograma s'acumuli més, tenint en compte el fet que com més acumulació hi hagi al canal auxiliar, més sediment entra al canal auxiliar. És a dir que el procés d'ompliment de la llera es retroalimenta i un cop ha començat a omplir-se de sediment més propensa és a omplir-se encara més, per tant està destinada al fracàs.

En resum, el model simula adequadament els processos d'erosió i acumulació de sediment per diferents condicions de contorn, però a l'hora de realitzar el càlcul del cas d'estudi s'imposen condicions més crítiques al model des del punt de vista de les simplificacions, ja que s'estan introduint unes condicions de contorn obtingudes amb l'HEC-RAS a partir d'una geometria més complexa i el model d'aquest treball només permet geometries més senzilles.

Pel cas d'estudi s'havia suposat que al llarg de l'hidrograma es produïa acumulació de sediment del canal en forma de falca i que sempre de mitjana hi havia acumulació de material, s'ha verificat que és així, de manera que les hipòtesis es compleixen i els càlculs són vàlids.

Futures línies de millora

A continuació es presenten un seguit de millores per al model que podrien permetre obtenir més bons resultats:

Primer de tot, per poder fer més versàtil el model i poder seguir obtenint resultats a la resta de nodes al llarg del tram d'estudi, independentment de si algun node s'ha sedimentat del tot, seria interessant anar traient del càlcul aquestes seccions on s'omple la llera i suposar que ni s'acumula ni s'erosiona material.

La complicació principal que comporta aquesta proposta és que en cas que s'erosionés de nou no sé sap on es produiria l'erosió i amb quin ample. Es podria simplificar suposant que s'erosiona el mateix ample existent prèviament, però no seria realista, ja que a la realitat la localització d'aquesta incisió pot produir-se de forma aleatòria.

Una altra millora del model seria guardar la història del material que ha sedimentat, de manera que quan s'erosionés de nou es conegués quina granulometria hi ha i no suposar-la constant com en aquest cas. Relacionat amb el sediment, es podria fer un anàlisi de l'efecte del factor β aplicat a l'equació (25)

Una altra millora seria considerar la tensió existent entre la massa d'aigua que passa per la llera i la que passa per les planes d'inundació.

Una altra possible millora seria tenir en compte les possibles variacions del cabal i del transport sòlid degut a la curvatura que pugui tenir el canal. En el cas d'estudi, s'ha pogut detectar al camp que hi va haver un flux d'aigua que no va seguir el curs del canal auxiliar i sembla ser que desembocava a davant del lloc on es van trencar els gabions (veure la Figura 3-8). Per tant s'hauria de considerar la curvatura del riu definint les distàncies entre seccions del marge dret, l'esquerre i l'eix com fa l'HEC-RAS.

Seguint en aquesta línia de ser més acurats en la definició de la geometria en planta, també es podria millorar la geometria de cada secció; de manera que es permetés la definició d'una geometria més complexa, ja que la simplificació de la geometria pot portar a error. En el cas d'estudi la simplificació és que tots els nodes inicialment tenen la mateixa profunditat i que la geometria de la llera principal és rectangular, en lloc de trapezoïdal; així com no considerar l'àrea de l'antiga llera abandonada, que és una àrea per on passa aigua pot induir a desajustos respecte la realitat.

Una altra opció per a millorar els resultats del cas d'estudi seria la obtenció d'unes condicions de contorn més verídiques, és a dir, en el cas del cabal sòlid,

mesurar el sediment en altres crescudes de magnituds similars i poder obtenir una aproximació més real del que entra.

Un altre punt feble de les condicions de contorn és la simplificació de l'efecte de la sedimentació, ja que s'ha considerat com si fos una falca, quan en realitat es podrien donar diferents situacions i el resultat variaria. De totes maneres al resultat del model s'han obtingut sedimentacions similars a una falca, de manera que la hipòtesis sembla coherent.

Una altra millora possible seria en el repartiment nodal, ja que s'ha vist que la granulometria del transport de fons és la mateixa pels tres trams (els dos braços i aigües amunt de la bifurcació), això és degut a la naturalesa de la relació nodal, ja que segons aquesta la granulometria només variaria per efecte de la gravetat quan hi hagi un pendent transversal. En aquest cas com no n'hi ha la granulometria es manté constant. A la realitat per efecte dels corrents tridimensionals la granulometria dels tres trams seria diferent.

Com a conclusió final dir que tot i les possibles millores que es proposen el model funciona i simula els processos que s'havien marcat com objectius, com s'ha dit abans.

7. Referències

- ASCE , 2008. *Sedimentation Engineering*. s.l.:ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice.
- Bolla Pittalunga, M., Luchi, R. & Seminara, G., 2013. On the equilibrium profile of river beds. Volume 119.
- Bownlie, W. R., 1983. Flow depth in sand-bed channels. Volume 109.
- CEDEX, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Flumen, CIMNE, 2014. *Manual de referencia hidráulico*. s.l.:s.n.
- Chang, H. H., 1988. *Fluvial Processes in river engineering*. s.l.:Wiley.
- Confederación Hidrográfica del Ebro, s.f. *Sistema Automático de Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro*. [En línea]
Available at: <http://www.saihebro.com/saihebro/index.php?url=/datos/ficha/estacion:A089>
- Cui, Y. & Parker, G., 2005. Numerical model of sediment pulses and sediment supply disturbances in mountain rivers.
- Cui, Y. et al., 2006. Dam removal express assessment models (DREAM). Part 1: model development and validation.
- Cui, Y., Parker, G., Pizzuto, J. & Lisle, T. E., 2003. Sediment pulses in mountain rivers: 2. Comparison between experiments and numerical predictions.
- Egiazaroff, I. V., 1965. Calculation of non-uniform sediment concentrations. Volume 91.
- Ferrer Boix, C., Boix Oliva, J., Martín Vide, J. P. & Ollero, A., 2018. Avulsion of a side-channel in a gravel-bed river. Field measurements and modelling. (Entregat).
- Ferrer Boix, C. & Hassan, M. A., 2013. Influence of the sediment supply texture on morphological adjustments in gravel-bed rivers.
- Ferrer Boix, C., Martín Vide, J. P. & Parker, G., 2014. Channel evolution after dam removal in poorly sorted sediment mixture: Experiments and numerical model.
- Grup Enciclopèdia Catalana, 2019. *diccionari.cat*. [En línia]
Available at: www.diccionari.cat
[Últim accés: 2019].
- Hermanos Caudevilla, S.L., 2015. *Documento Final de Obra. Proyecto de actuaciones de restitución de caminos en las riberas del río Gállego (aguas abajo del puente de Santa Isabel) término municipal de Zaragoza*, s.l.: s.n.
- Hoey, T. B. & Ferguson, R. I., 1994. Numerical simulation of downstream fining by selective transport in gravel bed rivers: Model development and illustration. Volume 30.
- Kamphuis, J. W., 1974. Determination of sand roughness for fixed beds. Volume 12.
- Kleinhans, M. G., Jagers, H. R. A., Mosselman, E. & Sloff, C. J., 2008. Bifurcation dynamics and avulsion duration in meandering rivers by one-dimensional and three-dimensional models. Volume 44.
- Lane, E. W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. Volume 81.
- lebenministerium, 2011. *LIFE-Project*. s.l.:s.n.
- Lee, P., Lambert, M. & Simpson, A., 2002. Critical depth prediction in straight compound channels. Volume 154.

- Martín Vide, J. P., 2002. *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Edicions UPC.
- Martín Vide, J. P., 2013. *Morfodinàmica fluvial*, s.l.: Paisea.
- Martín Vide, J. P., 2015. Restauración del río Besòs en Barcelona. Historia y lecciones.
- Martín Vide, J. P., Ferrer Boix, C. & Ollero, A., 2010. Incision due to gravel mining: Modelling a case study from the Gállego River, Spain. Volume 117.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R., 1948. *Formulas for bed-load transport*. Stockholm, Hydraulic Structures.
- Parker, G. & Andrews, E. D., 1985. Sorting of bedload sediment by flow in meandre bends. Volum 21.
- Sánchez Juny, M., Bladé, E. & Puertas, J., 2005. *Hidràulica*. Barcelona: Edicions UPC.
- Subramanya, K., 1997. *Flow in open channels*. Nova Delhi: Tata Mc Graw-Hill.
- Toro-Escobar, C. M., Parker, G. & Paola, C., 1996. Transfer function for the deposition of poorly sorted gravel in response to streambed aggradation. Issue 34.
- Universitat Politècnica de Catalunya; Mastergeo-Universidad de Zaragoza, 2017. *Estudio Hidrológico, geomorfológico, hidráulico y ecológico del bajo Gállego en el término municipal de Zaragoza para la sugestión como espacio fluvial dentro del desarrollo urbano sostenible de la ciudad de Zaragoza - Adenda. Medidas del transporte sólido*, Zaragoza: s.n.
- UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005. *Estudio Hidráulico y morfodinámico del río Gállego en Zaragoza*, s.l.: s.n.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, 2016. *Hydraulic Reference Manual*. s.l.:s.n.
- Viparelli, E. R. et al., 2010. River morphodynamics with creation/consumption of grain size stratigraphy 1: laboratory experiments.
- Wolman, M. G., 1954. *A method of sampling coarse river-bed material*. s.l.:American Geophysical Union Transactions.
- Wong, M. & Parker, G., 2006. Re-analysis and correction of bedload relation of Meyer-Peter and Müller using their own data base. Volume 132.

Annexos

Annex A. Model base

No s'adjunta el model, però si es vol consultar es pot demanar posant-se en contacte amb l'autora.

Annex B. Dades d'entrada de la granulometria del transport de fons

A continuació es presenten les dades de la granulometria d'entrada del transport de fons classificades per la falca considerada i pels 19 cabals totals del riu Gállego (discretització de cabals per fer els càlculs a l'HEC-RAS). No s'han adjuntat les dades ordenades pels cabals totals de l'hidrograma per la gran quantitat de dades que suposaria. Per obtenir-les s'han interpolat linealment partir de les dades de la Taula 0-1.

La informació està presentada de la següent manera: cada columna fa referència a una falca i cada conjunt de files d'un cabal determinat (especificat a la primera columna) inclou la funció de densitat de les distribucions granulomètriques.

Taula 0-1: Funció de densitat en funció del cabal total del riu Gállego i de la falca de sediment considerada al canal auxiliar.

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
5	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	32.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	32.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
34	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	32.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	16.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	8.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
54	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.00	0.04	0.00	0.06	0.06
	32.00	0.00	0.39	0.19	0.40	0.40
	16.00	0.36	0.26	0.36	0.25	0.25
	8.00	0.58	0.27	0.41	0.26	0.26
	4.00	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
74	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
	32.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	16.00	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25
	8.00	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26
	4.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
94	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06
	32.00	0.40	0.40	0.41	0.40	0.40
	16.00	0.25	0.25	0.24	0.26	0.25
	8.00	0.26	0.26	0.25	0.27	0.26
	4.00	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.0625	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
114	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
	32.00	0.41	0.40	0.41	0.40	0.41
	16.00	0.25	0.26	0.24	0.26	0.24

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
	8.00	0.25	0.27	0.25	0.26	0.25
	4.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
134	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
	32.00	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	16.00	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25
	8.00	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
	4.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
154	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
	32.00	0.40	0.41	0.41	0.40	0.41
	16.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	8.00	0.26	0.25	0.25	0.26	0.25
	4.00	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	8.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	4.00	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
194	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	8.00	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
	4.00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
214	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	8.00	0.25	0.25	0.25	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
234	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
254	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
274	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
294	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
314	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
334	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	64.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
354	128.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cabal total (m3/s)	D (mm)	Falca				
		Sense	0,25 m	0,47 m	0,75 m	1,00 m
	64.00	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
	32.00	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
	16.00	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	8.00	0.24	0.24	0.24	0.23	0.23
	4.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Annex C. Divisió de cabals

El següent annex ha de servir per explicar amb detall com s'ha realitzat la divisió de cabals entre els dos braços de la bifurcació per poder imposar la condició de contorn a l'extrem superior del model numèric.

La divisió de cabals s'ha realitzat amb un model d'HEC-RAS, el qual està basat amb el model del 2004 citat a l'apartat 3.2.3 però amb modificacions al tram d'estudi per incloure el canal auxiliar i les variacions existents en aquella zona des del 2004 fins al 2016. Només s'han utilitzat les seccions que apareixen a l'esquerra de la Figura 3-11 i s'han modificat les seccions contingudes al tram d'estudi a partir de seccions obtingudes dels MDT de l'octubre de 2015 per incloure el canal auxiliar i de les seccions realitzades per l'investigador Pedro Duarte per actualitzar la geometria del riu.

A més a més de canviar la geometria també s'ha hagut de dividir el riu en 4 trams (veure la Figura 0-1). El primer és el tram situat aigües amunt de la bifurcació, els dos següents són un pel riu en el tram que es contigu al canal i l'altre pel canal auxiliar i l'últim és el tram aigües avall de la reunió dels dos braços (canal auxiliar i riu). Per poder realitzar aquesta divisió de la geometria s'ha hagut de dividir la illa entre els dos braços del riu i assignar cada part a un dels dos braços. Com a criteri s'ha dividit la illa en dos per la cota més alta i s'ha assignat una meitat com a plana d'inundació de l'esquerra del riu Gállego i l'altra meitat com a plana d'inundació de la dreta del canal auxiliar.

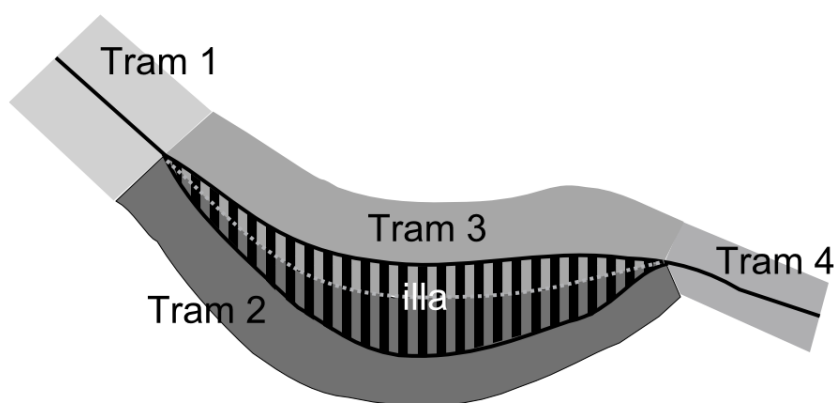


Figura 0-1: Croquis dels 4 trams considerats inicialment. Els trams 1, 2 i 4 corresponen al riu Gállego des d'aigües amunt a aigües avall. El tram 3 és el corresponent al canal auxiliar. La illa correspon a l'àrea zebra i la línia puntejada en gris representa la seva divisió entre el braç del Gállego i del canal auxiliar.

Un cop definida la geometria utilitzada per l'HEC-RAS i mantenint els coeficients de Manning existents al model del 2004, obtinguts a partir de fotografies aèries i de treball de camp (UPC - Departamento de Ingeniería Hidráulica, M y A, 2005); s'ha realitzat el càlcul en règim permanent pels diferents cabals de l'hidrograma conjunt del 2016. L'hidrograma de la Figura 4-18 s'han discretitzat en cabals cada 20 m³/s aproximadament, per tant s'han realitzat 19 càlculs en règim permanent, sent el màxim 354 m³/s i el mínim 5m³/s.

El model hidràulic d'HEC-RAS calcula la distribució de cabals pels dos braços de la bifurcació tot assegurant que l'energia al node aigües amunt de la bifurcació sigui la mateixa tant recorrent les seccions del canal auxiliar com les seccions del riu Gállego (braç dret de la bifurcació, veure la Figura 3-10).

S'ha de tenir en compte que en funció del cabal que passa pel riu la illa entre els dos braços està més o menys coberta d'aigua, fins arribar al punt que en algunes seccions està totalment coberta; de manera que es produeix una transferència de cabal d'un braç a un altre.

Quan aquesta situació es produeix no té sentit considerar els dos braços per separat ja que actuen com una única secció. Per tant el que s'ha fet és introduir les antigues seccions dels trams 2 i 3 com una única secció al tram 1 o 4 en funció de si la secció es troba més propera a la bifurcació o a la reunió dels dos braços.

Per tenir en compte aquesta transferència de cabals s'han definit diferents geometries del model en funció de la longitud considerada dels trams 2 i 3, i indirectament dels altres dos.

També s'ha estudiat l'efecte de la sedimentació en la distribució de cabals entre els dos braços. Això s'ha realitzat a partir de modificar la cota del fons del canal auxiliar i considerant diferents falques de sedimentació. Entenem com a falca de sedimentació l'acumulació de material al canal auxiliar que té el màxim aigües amunt i va disminuint de cota de forma gradual cap a aigües avall fins arribar a l'extrem inferior del canal auxiliar on no hi ha acumulació de sediment. S'han realitzat 4 escenaris diferents on es diferencien per la sedimentació mitjana equivalent; aquesta s'ha calculat com el volum de sediment total acumulat a la falca dividit per la longitud del canal auxiliar. Les sedimentacions mitjanes considerades són 1m, 0,75 m, 0,47 m i 0,25 m. L'acumulació mitjana mesurada al canal auxiliar és de 0,9 m (veure l'apartat 3.1) i per tant inferior a la falca màxima considerada.

Només s'han considerat casos amb acumulació de material a la llera, en cas que en algun instant de temps de mitjana hi hagués erosió s'agafarien els valors pel cas sense falca.

Al realitzar les diferents simulacions per cada falca amb l'HEC-RAS també s'ha tingut en compte la transferència de cabals explicada anteriorment. Per tant les seccions on l'aigua cobreix completament la illa s'han considerat com seccions úniques.

Annex D. Relació nodal

A continuació es presenten les equacions de la relació nodal utilitzada pel repartiment de cabals sòlids a la bifurcació.

Com ja s'ha introduït a l'apartat 4.4.3 el cabal sòlid (Q_{s2}) que passa per un dels braços, en aquest cas el canal auxiliar, és funció de:

- Les amplades (B) dels 3 trams que intervenen en el càlcul: els dos braços de la bifurcació i el tram aigües amunt.
- El cabal sòlid aigües amunt de la bifurcació (Q_{s1}) obtingut amb l'equació de Meyer-Peter i Müller modificada per mescles.
- El cabal sòlid en direcció perpendicular al flux (q_{sy}) obtingut amb l'equació (34).
- La distància aigües amunt de la bifurcació on desapareix el pendent transversal ($\alpha_w B_1$). Es considera un valor de α_w de 2.

La Figura 0-2 és un croquis que descriu les variables més importants necessàries per aplicar la relació nodal.

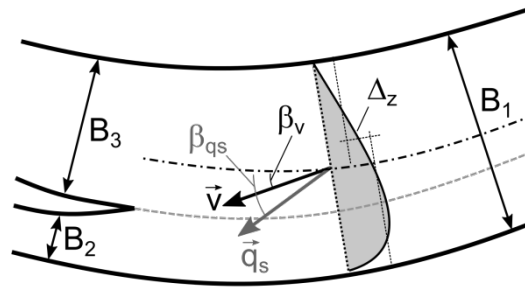


Figura 0-2: Croquis en planta de la bifurcació i les variables involucrades per determinar el repartiment de cabals. B1, B2, B3 són les amplades del tram aigües amunt i dels dos braços de la bifurcació respectivament. β_v i β_{qs} són els angles que formen les dues components de la velocitat, v i q_s , respectivament. Δ_z és la diferència de cota mitjana entre el marge esquerre i el dret de la secció característica aigües amunt de la bifurcació. Font: (Ferrer Boix, et al., 2018)

L'equació que relaciona les variables anteriors per obtenir el cabal sòlid al canal auxiliar és la següent:

$$Q_{s2} = \frac{B_2}{B_2 + B_3} Q_{s1} + q_{sy} \alpha_w B_1 \quad (33)$$

El valor del cabal sòlid en la direcció perpendicular al flux es calcula amb la següent fórmula:

$$q_{sy} = \tan \beta_s Q_{s1} / B_1 \quad (34)$$

on $\tan \beta_s$ es calcula amb la següent expressió:

$$\tan \beta_s = \frac{\sin \beta_\tau - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z}{\partial y}}{\cos \beta_\tau - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z}{\partial x}} \quad (35)$$

on,

β_τ és la direcció del vector de la tensió del fons (37).

$\frac{\partial z}{\partial y}$ és el pendent transversal del riu aigües amunt de la bifurcació. En el cas d'estudi el pendent és zero, de manera que desapareix de l'equació.

$\frac{\partial z}{\partial x}$ és el pendent longitudinal del riu aigües amunt de la bifurcació (0,0027).

$f(\theta)$ és una funció que depèn del calat i de la granulometria de la secció aigües amunt de la bifurcació i de la tensió adimensional del fons (39).

Eliminant els paràmetres que són zero l'equació queda de la següent manera:

$$\tan \beta_s = \frac{\sin \beta_\tau}{\cos \beta_\tau - \frac{1}{f(\theta)} \frac{\partial z}{\partial x}} \quad (36)$$

La direcció β_τ es calcula amb la següent expressió:

$$\beta_\tau = \arctan \frac{v}{u} - \arctan A \frac{h}{R} \quad (37)$$

on,

$\frac{v}{u}$ és la relació entre la velocitat mitjana en la direcció del corrent (v) i en la direcció transversal (u). Que aquesta relació per les dades obtingudes a camp es considera que és 0,1 (veure l'apartat 3.2.2).

h és el calat en metres. S'ha imposat el calat obtingut de l'HEC-RAS a la secció aigües amunt de la bifurcació, el qual depèn tant del cabal com de la falca de sediment existent al canal auxiliar.

R és el radi de curvatura de les línies de corrent (236 m).

A en aquest cas és el coeficient del flux en espiral que es defineix:

$$A = \frac{2\varepsilon}{\kappa^2} \left(1 - \frac{\sqrt{g}}{\kappa C} \right) \quad (38)$$

on,

ε és un coeficient de calibració (es considera de valor unitari).

κ és la constant de Kármán (0,4)

g és la gravetat (m/s²)

C és el coeficient de rugositat de Chezy. Aquest depèn del calat entre d'altres paràmetres.

La funció $f(\theta)$ es defineix:

$$f(\theta) = 9 \left(\frac{D}{h} \right)^{0,3} \sqrt{\theta} \quad (39)$$

on,

D és el diàmetre de sediment. En aquest cas és fa el càlcul per cada fracció granulomètrica.

θ és la tensió adimensional del fons que es calcula per cada fracció granulomètrica i considerant el fenomen d'exposició i ocultament explicat a l'apartat 4.1.2.

Aplicant les equacions anteriors s'ha obtingut el cabal sòlid per fraccions que entra al canal auxiliar. S'ha observat que imposant el calat obtingut de les simulacions de l'HEC-RAS es permet obtenir cabals sòlids diferents en funció de la falca existent, ja que si es calculava el calat en funció de la geometria de la secció s'obtenien els mateixos cabals sòlids independentment de la falca que hi hagués al canal auxiliar.